



**FORUM GURU BESAR**  
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



# Orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



## **PERAN ENERGI NUKLIR DALAM MENDUKUNG *NET ZERO EMISSION* INDONESIA**

**Pentingnya Non Proliferasi Nuklir dan Pemanfaatan  
Teknologi Reaktor Maju serta Implementasinya**

**Profesor Sidik Permana**

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Institut Teknologi Bandung

Aula Barat ITB  
17 Februari 2024



Orasi Ilmiah Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung

**PERAN ENERGI NUKLIR DALAM  
MENDUKUNG *NET ZERO EMISSION*  
INDONESIA**

Pentingnya Non-proliferasi Nuklir dan Pemanfaatan  
Teknologi Reaktor Maju serta Implementasinya



Orasi Ilmiah Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung

# **PERAN ENERGI NUKLIR DALAM MENDUKUNG *NET ZERO EMISSION* INDONESIA**

Pentingnya Non-proliferasi Nuklir dan Pemanfaatan  
Teknologi Reaktor Maju serta Implementasinya

**Prof. Sidik Permana**

17 Februari 2024  
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

*Orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:*

**PERAN ENERGI NUKLIR DALAM MENDUKUNG**

**NET ZERO EMISSION INDONESIA:**

***Pentingnya Non-proliferasi Nuklir dan Pemanfaatan Teknologi Reaktor  
Maju serta Implementasinya***

Penulis : Prof. Sidik Permana

Reviewer : Prof. Zaki Su'ud

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2024

ISBN : 978-623-297-410-4

e-ISBN : 978-623-297-411-1 (PDF)

**ITB PRESS**

© Gedung STP ITB, Lantai 1,  
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132  
☎ +62 22 20469057  
🌐 www.itbpress.id  
✉ office@itbpress.id  
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92  
APPTI No. 005.062.1.10.2018

Buku ini dipersembahkan untuk Ibunda dan Almarhum Ayahanda tercinta, bagi Istri tersayang, dan Anak-anakku terkasih, semoga menjadi manusia dewasa, merdeka dan berkah serta bermanfaat bagi banyak orang.

*” Wahai orang-orang yang beriman, apabila dikatakan kepadamu, berilah kelapangan di dalam majelis-majelis, maka lapangkanlah. Niscaya Allah Swt. akan memberi kelapangan untukmu. Apabila dikatakan, berdirilah kamu, maka berdirilah. Niscaya Allah Swt. akan mengangkat (derajat) orang-orang yang beriman di antaramu dan orang-orang yang diberi ilmu beberapa derajat. Allah Swt. Mahateliti apa yang kamu kerjakan.”*

*(Surah al-Mujadalah/ 58: 11)*





# PRAKATA

Alhamdulillah, puji syukur kehadiran kepada Allah Swt., Tuhan Yang Maha Kuasa yang dengan perkenan dan rahmatnya serta kekuatannya akhirnya buku orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung ini dapat diselesaikan dengan baik.

Buku orasi ilmiah ini disusun berdasarkan pada aktivitas Tridarma penulis khususnya pada bidang penelitian dan pengembangan ilmu dan teknologi (IPTEK) Nuklir. Proses dan isi penulisan buku ini juga didasarkan pada aspek kolaborasi penulis dan diskusi serta aktivitas diseminasi dalam bentuk seminar, kelas, narasumber, konsultasi dan lainnya dalam komunitas, pekerjaan dan kegiatan lainnya baik formal maupun informal.

Dengan buku ini, diharapkan dapat memberikan informasi dan gambaran umum yang berkaitan dengan peranan penting energi nuklir, potensi pemanfaatan energi nuklir dari mulai aspek non-proliferasi nuklir, aspek pengembangan reaktor maju dan generasi ke-IV, dan bagaimana energi nuklir mempunyai peran strategis dalam pemenuhan program *net zero emission* (NZE) Indonesia dan implementasinya di Indonesia yang merupakan bagian dari komunitas global yang juga saat bersamaan mencanangkan program yang sama dalam memenuhi kebutuhan listrik dunia yang rendah karbon atau energi bersih. Buku ini juga memberikan gambaran keuntungan pemanfaatan energi nuklir dan arah kebijakan implementasi kebijakan pemerintah khususnya kontribusi energi nuklir dalam bauran energi nasional. Sebagai bagian dari arah kebijakan yang jelas dalam rangka pemenuhan target pemanfaatan energi dari sumber energi baru dan terbarukan yang bersih, ramah lingkungan, handal dari segi keamanan suplai energi, aman dan terjangkau.

Buku ini akan menjelaskan tema-tema yang difokuskan pada potensi implementasi energi nuklir dan keuntungan pemanfaatannya, khususnya dalam pemenuhan program NZE yang terdiri atas tema di bawah ini, walaupun tidak terbatas pada:

- 1 Bagian pendahuluan terkait energi, lingkungan dan manusia
- 2 Gambaran umum pemanfaatan ilmu dan teknologi nuklir dan aplikasi, serta Program Energi Nuklir Indonesia

- 3 Aktivitas Pengembangan IPTEK energi nuklir dari non-proliferasi nuklir sampai, Reaktor Maju, Program NZE, dan *monitoring* radiasi lingkungan.
- 4 Potensi pemanfaatan energi nuklir, keuntungan kompetitif, *Sustainable Development Goals* (SDGs), aspek ekonomi, *small modular reactor* (SMR), dan pemanfaatan untuk zona industri, ekonomi khusus, dan program dedieselisasi di (mana)
- 5 Pembahasan terkait implementasi energi nuklir dan kontribusi dalam program NZE nasional.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Zaki Su'ud selaku *reviewer* buku ini, Dr. Cici Wulandari untuk bantuan proses editing. Penghargaan yang tinggi kepada bapak almarhum Prof. Dr. Ir. Kuntoro Mangkusubroto, M.Eng atas perhatian dan diskusi hangatnya sebagai inspirator dalam ide kajian implementasi PLTN khususnya SMR dalam program energi nasional. Kepada kolega di Kelompok Keahlian (KK) Fisika Nuklir dan Biofisika (FNB) yang selalu memberi semangat. Terima kasih kepada mahasiswa baik S-1, S-2 dan S-3 serta posdoktoral dan tenaga pendidikan di KK FNB. Kepada keluarga saya, istri, dan anak-anak yang memberikan kekuatan dan kehangatan serta kesabarannya dalam proses pembuatan buku ini. Tidak lupa kepada kolega lainnya yang telah memberikan inspirasi dan semangat serta dukungannya sehingga akhirnya buku ini dapat diselesaikan.

Kesempurnaan hanya milik Allah Swt., oleh karenanya tiada gading yang tak retak, tentunya buku ini masih jauh dari kesempurnaan. Dengan banyaknya kritik dan masukan dapat membuat buku ini semakin baik dan banyak manfaatnya bagi seluruh pembaca dan komunitas terkait yang tertarik dengan program energi khususnya energi nuklir di Indonesia.

Bandung, Februari 2024

Penulis

# SINOPSIS

Persoalan-persoalan ke depan yang perlu dihadapi oleh penduduk bumi saat ini telah menjadi *concern* tersendiri terutama bagi penggiat energi dan lingkungan dalam rangka memenuhi tuntutan perkembangan dunia dan juga tren gaya hidup yang terjadi akibat semakin modernnya era teknologi dan banyaknya negara-negara industri baru bermunculan. Berdasarkan pengamatan Richard Smalley yang merupakan salah satu penerima hadiah Nobel Laureate (Bidang Kimia 1996), beliau memaparkan bahwa ada 10 permasalahan dunia teratas dalam jangka waktu 50 tahun ke depan dan dalam pengamatannya, energi menjadi prioritas atau menjadi permasalahan utama dibandingkan permasalahan lainnya. Prioritas permasalahan energi menjadi nomor satu dibandingkan dengan permasalahan air, makanan bahkan lingkungan. Setiap aktivitas manusia dapat berkontribusi bagi pemanasan global dengan porsinya masing-masing. Proses pembangkitan energi menjadi koncern tersendiri dikarenakan proses ini berkontribusi terbanyak bagi pemanasan global yang secara cukup efektif bisa dikontrol gas buangnya apabila bisa dipilih jenis bahan bakar atau manajemennya agar tidak menghasilkan atau berkurang gas rumah kacanya langsung ke atmosfer. Skenario Emisi Nol Bersih pada tahun 2050 (Skenario NZE) adalah skenario normatif yang menunjukkan jalur bagi sektor energi global untuk mencapai nol emisi CO<sub>2</sub> pada tahun 2050, dengan negara-negara maju mencapai nol emisi bersih lebih dulu dibandingkan negara-negara lain. Target penerapan program NZE masing-masing negara yang berbeda-beda, tetapi secara umum rata-rata pada sekitar tahun 2050. Ada target NZE yang lebih cepat, yaitu negara di Eropa seperti Swedia dan Jerman, sementara ada juga yang menargetkan NZE mereka di tahun 2070 seperti India. Sedangkan Indonesia program NZE-nya tercapai di 2060 seperti halnya Cina. Indonesia mempunyai peta jalan program *Net Zero Emission* (NZE) 2060, sebagai bagian dari komunitas internasional dalam merespon pandangan global dan kebutuhan nasionalnya.

Program NZE yang telah diumumkan dalam upaya memenuhi kebutuhan energi nasional secara bertahap dan saat yang sama program ini mengombinasikannya dengan program pengurangan emisi CO<sub>2</sub> sebagai program ambisius nasional dengan penekanan pada pemanfaatan energi

hijau atau energi rendah emisi di Indonesia. Kebijakan NZE ini akan memperkuat sumber daya energi hijau nasional berbasis pada sumber daya energi baru dan terbarukan (EBT). Melalui program NZE ini, kontribusi EBT akan dominan dan pada saat yang sama energi fosil akan berkurang secara bertahap sebelum tahun 2060. Pemanfaatan energi nuklir untuk aplikasi energi di antaranya untuk pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) dan aplikasi kogenerasi energi seperti desalinasi air, produksi hidrogen, untuk aplikasi gasifikasi dan pencairan batubara dan peningkatan pemulihan minyak (EOR) yang dapat digunakan untuk program NZE sebagai bagian multifungsi pemanfaatan energi. Buku ini dibuat dalam rangka menunjukkan kontribusi energi nuklir terhadap implementasi Program Net Zero Emission (NZE) di Indonesia sebagai bagian penting EBT dengan emisi karbon rendah. Selain itu analisis pemanfaatan PLTN baik yang berdaya besar, sedang, dan kecil serta daya mikro, yang dapat dimanfaatkan di seluruh Indonesia berdasarkan kebutuhan beban daya dan wilayah. Implementasi program nuklir dapat memenuhi kebutuhan daya di beberapa program pemerintah terkait daerah industri dan ekonomi khusus di Indonesia dan juga program de-dieselisasi dalam rangka mengganti pembangkit diesel dengan Energi Baru Terbarukan (EBT). Analisis Gap terhadap kebutuhan daya dan potensi suplai sumber daya energi serta *roadmap* implementasi energi nuklir di Indonesia juga di sampaikan pada bagian akhir buku ini.

Analisis keunggulan kompetitif energi nuklir, evaluasi berdasarkan program emisi nol bersih yang difokuskan pada kontribusi program PLTN, analisis daya saing ekonomi PLTN dengan mengadopsi biaya yang diratakan metodologi LCOE, evaluasi berdasarkan strategi pemetaan skala kapasitas listrik PLTN untuk kebutuhan listrik di Indonesia, analisis dan pemetaan pemanfaatan PLTN untuk tujuan khusus kawasan ekonomi atau industri khusus dan program de-dieselisasi yang merupakan sebagian program nasional program proyek elektrifikasi untuk daerah terpencil dan zona terisolasi telah di evaluasi. Dalam program NZE, energi nuklir sebagai bagian dari energi baru dan terbarukan berkontribusi pada bauran energi nasional mulai tahun 2040 untuk kontribusi NPP secara akumulatif 8-10% dan demikian akan terus mengalami kenaikan. Dengan demikian pembangunan dan persiapan harus segera dilakukan di tahun 2023-2025 ini. Program nuklir harus dilaksanakan mulai dari perencanaan, persiapan dan investasi serta

penyiapan sumber daya manusia dan beberapa infrastruktur lain untuk program energi nuklir.

Sebagai bagian dari rekomendasi, analisis LCOE PLTN telah dilakukan dan menunjukkan bahwa LCOE PLTN di Eropa berkisar antara 42 USD/MWh sampai dengan 102 USD/MWh, dan LCOE di Amerika Serikat dapat dilihat pada kisaran 71. Analisis serupa telah dilakukan untuk LCOE di Asia yang menunjukkan bahwa LCOE di Asia berkisar antara 50 USD/MWh hingga 87 USD/MWh. LCOE untuk tipe SMR diperkirakan memiliki nilai rata-rata 60 USD/MWh dan nilai maksimum LCOE sekitar 90 USD/MWh. Berdasarkan 26 kawasan industri, memiliki rentang kebutuhan listrik 10 MWe hingga kisaran daya 1000 MWe. Penyebaran program de-dieselisasi sangat tersebar di seluruh pulau di Indonesia dan daerah tersebut memiliki kebutuhan listrik tergantung daerahnya untuk kebutuhan listrik berkisar antara 0,6 MWe sampai dengan 550 MWe. Energi nuklir berkontribusi sebesar 18 % yang setara dengan 324 TWh pada tahun 2060 sebagai bagian dari program NZE. Ini menunjukkan Pulau Jawa akan memiliki sekitar 214 TWh listrik dari energi nuklir, sedangkan Pulau Sumatra akan menggunakan 64 energi Nuklir dan pulau lainnya Kalimantan, Sulawesi, dan sisanya akan menggunakan masing-masing 14,4 TWh, 16,7 TWh dan 14,2 TWh. Jika kebutuhan listrik dalam TWh diubah menjadi kapasitas daya pembangkit listrik, maka akan setara dengan kapasitas daya PLTN sekitar 46 GWe dengan rincian kontribusi berdasarkan data statistik saat ini, bahwa Pulau Jawa membutuhkan kapasitas terpasang PLTN di tahun 2060 sekitar 30,3 GWe, Pulau Sumatra 9 GWe dan pulau lainnya membutuhkan 2-2,4 GWe.

Sebagai bagian dari analisis gap, evaluasi kontribusi Energi Terbarukan (ET) telah dilakukan dan di asumsi ET dapat dimanfaatkan 100% dari potensi ET (430 GWe atau setara 1159 TWh) dan untuk memenuhi gap ke 1800 TWh, energi fosil dan energi nuklir dapat mengisi gap tersebut. Apabila kontribusi EBT 100%, yaitu energi terbarukan dan nuklir menjadi 100%, maka kontribusi energi nuklir dapat memenuhi gap tersebut menjadi 641 TWh untuk memenuhi target NZE listrik sekitar 1800 TWh di tahun 2060. Energi nuklir diperkirakan beroperasi dan berkontribusi pada bauran energi nasional mulai di periode 2030-2035 dan 2035-2040, dan berdasarkan beberapa skenario dan PLTN harus diimplementasikan sebagai program NZE mulai tahun 2023-2024 untuk mencapai operasi awal tahun 2030-an. Dalam penyelenggaraan tenaga nuklir, diperlukan suatu NEPIO atau Organisasi Pelaksana Program Tenaga

Nuklir yang bertugas melaksanakan program tenaga nuklir mulai dari perencanaan, persiapan dan investasi serta menyiapkan sumber daya manusia dan beberapa infrastruktur lain untuk program energi nuklir.

# DAFTAR ISI

PRAKATA.....	v
SINOPSIS .....	vii
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xxiii
1. ENERGI, LINGKUNGAN, DAN MANUSIA.....	1
1.1 Kebutuhan Energi Dunia.....	1
1.2 Efek terhadap Lingkungan dari Pemanfaatan Energi Dunia.....	7
1.3 Program <i>Net Zero Emission Dunia</i> .....	12
1.4 Program <i>Net Zero Emission Indonesia</i> .....	15
1.5 Program Energi Baru dan Terbarukan di Indonesia .....	17
1.6 Program Energi Nuklir di Indonesia.....	21
1.7 Pemanfaatan Energi Nuklir Dunia .....	24
1.8 Energi untuk Pembangunan Berkelanjutan (SDG) .....	25
1.9 Index Pembangunan Manusia (IPM/HDI) dan Konsumsi Energi.....	27
2. IPTEK NUKLIR DAN APLIKASI .....	31
2.1 Prinsip Dasar Pemanfaatan Reaksi Nuklir.....	31
2.2 Sejarah Pemanfaatan Energi Nuklir .....	33
2.3 Perkembangan Teknologi Nuklir PLTN di Dunia .....	38
2.4 Pemanfaatan Teknologi Nuklir di Indonesia .....	44
2.5 Pengalaman Indonesia dalam Pengembangan Teknologi Nuklir .....	47
2.6 Evaluasi Kebijakan Energi Nasional dan Energi Nuklir.....	48
3. AKTIVITAS PENGEMBANGAN IPTEK NUKLIR .....	53
3.1 Aplikasi Energi Nuklir: Energi dan Non Energi.....	53
3.2 Evaluasi Aspek Non-Proliferasi Nuklir.....	56
3.3 Proteksi Proliferasi Plutonium dan Metodologi Material Attractiveness.....	64
3.4 Fisika Reaktor dan Desain Teras Reaktor Nuklir.....	72
3.5 Daur Ulang Bahan Bakar Nuklir.....	75
3.6 Faktor Multiplikasi Neutron dan Reaktivitas Reaktor .....	76
3.7 Efek Komposisi Thorium, Plutonium, dan Uranium Terkait Aspek Non-proliferasi Nuklir .....	78
3.8 Analisis Reaktor Generasi 4 dan <i>Small Modular Reactor</i> (SMR). 80	
4. ENERGI NUKLIR DALAM PROGRAM NZE 2060 INDONESIA .....	105

4.1	Analisis Kondisi Kelistrikan Nasional.....	105
4.2	Permasalahan Implementasi PLTN.....	108
4.3	Pemanfaatan Energi Nuklir.....	113
4.4	Analisis Keunggulan Kompetitif Energi Nuklir .....	116
4.5	SDG Energi Nuklir, Energi Ramah Lingkungan, dan Berkelanjutan.....	135
4.5.2	Aspek Sosial Energi Nuklir.....	144
5.5.3	Aspek Ekonomi Sumber Energi Nuklir.....	149
4.6	Penyedia Teknologi Reaktor Nuklir .....	158
4.7	Evaluasi Program <i>Net Zero Emission</i> (NZE) .....	160
4.8	Evaluasi Biaya Produksi Listrik Reaktor Besar (LCOE) .....	168
4.9	Evaluasi Biaya <i>Small Modular Reactor</i> (SMR) .....	175
4.10	PLTN SMR untuk Zona Industri dan Ekonomi Khusus .....	178
4.11	PLTN SMR dan Reaktor Mikro untuk Program De-dieselisasi	182
5.	IMPLEMENTASI ENERGI NUKLIR PADA PROGRAM NZE .....	187
5.1	Peta Kebutuhan Listrik dari PLTN pada Program NZE .....	187
5.2	Gap Kebutuhan Listrik 2060 NZE .....	190
5.3	PLTN untuk Listrik dan Ko-generasi .....	197
5.4	Pemanfaatan PLTN <i>Small Modular Reactor</i> (SMR).....	198
5.5	PLTN Untuk Kawasan Industri Khusus dan De-dieselisasi .....	199
5.6	Estimasi Pemenuhan Gap Produksi Listrik Program NZE EBT200	
5.7	Distribusi Pembangunan PLTN Program NZE Indonesia .....	200
5.8	Rencana Implementasi dan Peta Jalan PLTN Program NZE ....	201
5.9	Rencana Pemenuhan Gap Kebutuhan Listrik Program NZE...	207
5.10	Organisasi Pelaksana Implementasi Energi Nuklir .....	208
	PENUTUP .....	211
	UCAPAN TERIMA KASIH .....	213
	DAFTAR PUSTAKA .....	215
	PROFIL PENULIS .....	227



# DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Perkiraan penduduk dunia.....	1
Gambar 2	Sejarah penggunaan energi manusia.....	2
Gambar 3	Pemanfaatan energi nuklir dan terbarukan di abad 20 .....	3
Gambar 4	Profil kebutuhan dan konsumsi energy dunia dari tahun 2000. ....	5
Gambar 5	Komposisi konsumsi energi listrik dunia tahun 2021.....	6
Gambar 6	Komposisi Emisi Gas CO2 dari berbagai jenis pembangkit (Carbon Dioxide Emissions from Power Plants   The Siemens Stiftung Media Portal, 2019).....	7
Gambar 7	Emisi gas rumah kaca yang di kelurkan dari berbagai jenis aktivitas manusia. ....	8
Gambar 8	“Sektor demi sector : Dari Mana Asal Emisi Gas Rumah Kaca Global?” (Ritchie & Roser, 2020a) .....	8
Gambar 9	Konsentrasi emisi gas rumah kaca di atmosfer sepanjang 2000 tahun (IPCC, 2007) .....	9
Gambar 10	Perubahan suhu permukaan bumi dari tahun 1970-2004 .....	10
Gambar 11	Perkiraan perubahan suhu permukaan bumi sampai 2100 ....	11
Gambar 12	Target NZE masing-masing negara di dunia yang bervariasi ..	12
Gambar 13	Rata-rata perbedaan temperature permukaan tahun 1880- 2022.....	14
Gambar 14	Proyeksi Bauran Energi Program NZE Global dan Indonesia .....	16
Gambar 15	Potensi Sumber Daya Energi Baru Terbarukan Indonesia Yang Berbeda Beda (Permana et al., 2021, 2022) .....	17
Gambar 16	Potensi Distribusi Energi Baru Terbarukan Indonesia di Tiap Provinsi (Permana et al., 2021) .....	18
Gambar 17	Sumber daya energi nuklir dan potensi di Indonesia (Kai Putri et al., 2022) .....	20
Gambar 18	Reaktor TRIGA 2000 BRIN di Bandung.....	22
Gambar 19	Tiga ‘Pilar’ Keberlanjutan (Sustainability) (World Nuclear Association, 2022a).....	26
Gambar 20	Tujuan pembangunan berkelanjutan (SDG) PBB (World Nuclear Association, 2022a).....	26

Gambar 21	Index Pembangunan Manusia (IPM/HDI) dan Konsumsi Energi Per-capita Tahunan, 2020 (World Nuclear Association, 2022a).....	27
Gambar 22	Index Pembangunan Manusia (IPM/HDI) dan Konsumsi listrik [kWh] Per-capita Tahunan, 2021 (Sumber: (UNECE, 2021)) .....	28
Gambar 23	Peta Kelistrikan Dunia (Deendarlianto, 2015).....	29
Gambar 24	Prinsip pemanfaatan energi dari reaksi nuklir .....	31
Gambar 25	Sejarah IPTEK Nuklir Dunia sampai pertengahan tahun 1950-an (Sekimoto, 2002) .....	33
Gambar 26	Experiment Fermi CP-1 di Universitas Chicago 1942 (Sekimoto, 2002) .....	34
Gambar 27	Konsep dasar pemanfaatan energy nuklir (Sekimoto, 2002)...	34
Gambar 28	Kapal Selam Berpendorong Nuklir Pertama (Nautilus and Seawolf, 1953).....	35
Gambar 29	Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) pertama di Dunia (Obninsk APS-1, Soviet Union, 1954).....	36
Gambar 30	Pemanfaatan energi nuklir untuk tujuan damai dan Sipil (Sekimoto, 2002) .....	37
Gambar 31	Negara negara yang memanfaatkan PLTN sebagai energi nasionalnya 2022 (World Nuclear Association, 2023; IAEA PRIS, 2022) .....	38
Gambar 32	Populasi Negara negara didunia (Wikimedia, 2017) .....	39
Gambar 33	Sebaran negara-negara yang memanfaatkan dan berminat menggunakan PLTN (Omoto, 2007).....	40
Gambar 34	Status PLTN 2021 dan negara negara yang mengoperasikan PLTN (World Nuclear Association (WNA), 2023).....	40
Gambar 35	Sebaran di antara beberapa negara yang sedang membangun PLTN (visualcapitalist, 2023). .....	41
Gambar 36	Sperkiraan beberapa negara baru yang berminat menggunakan PLTN dimasa datang (Global, 2005). .....	42
Gambar 37	Riset dan pengembangan Teknologi Nuklir Indonesia (Badan Tenaga Nuklir Nasional, 2003).....	43
Gambar 38	Aplikasi nuklir untuk listrik dan ko-generasi (produksi kelebihan panas / <i>excess heat</i> ) (Reyes & Hopkins, 2018; World Nuclear Association, 2021) .....	53

Gambar 39	Program Inisiatif NuScale Diverse Energy Platform (NuDEP) (IAEA, 2017) .....	54
Gambar 40	Aplikasi Nuklir Non-Energi: Radiasi Pengion (Bezdek, 2021).....	55
Gambar 41	Manfaat dan risiko pemanfaatan energi nuklir (BAPETEN, 2005).....	56
Gambar 42	Target energi nuklir untuk tujuan damai (Artisyuk V and M. Saito, 2006) .....	57
Gambar 43	Terminologi terkait aspek non-proliferasi nuklir(Artisyuk V and M. Saito, 2006). .....	58
Gambar 44	Terminologi Terkait Kualitas dan penghalang (barrier) material nuklir(Artisyuk V and M. Saito, 2006) .....	60
Gambar 45	Evaluasi Karakteristik <i>Proliferation Resistance</i> (PR) Untuk Uranium (Artisyuk V and M. Saito, 2006) .....	61
Gambar 46	Massa kritis untuk berbagai pengayaan uranium .....	62
Gambar 47	Evaluasi karakteristik <i>Proliferation Resistance</i> (PR) untuk Aktinida Minor (Artisyuk V and M. Saito, 2006) .....	63
Gambar 48	Karakteristik Fisik <i>Barrier</i> Isotop Untuk Produksi Proliferasi Plutonium (Artisyuk V and M. Saito, 2006) .....	65
Gambar 49	Pengaruh Komposisi Plutonium Terhadap <i>Decay Heat</i> dan <i>Spontaneous Fission Neutron</i> .....	66
Gambar 50	Skema analisis pendekatan <i>Material attractiveness</i> .....	70
Gambar 51	Alur analisis bahan bakar nuklir LWR yang digunakan untuk <i>Fast Breeder Reactor</i> (FBR) .....	73
Gambar 52	Desain Teras Reaktor Nuklir reaktor cepat berbahan bakar padat .....	74
Gambar 53	Mekanisme rantai daur ulang bahan bakar nuklir .....	75
Gambar 54	Struktur dari HTTR (Iwatsuki et al, 2021) .....	80
Gambar 55	Prosedur Perhitungan Fisika Reaktor (Chiba, 2018) .....	82
Gambar 56	HTGR Prismatic dan Pebble Bed (Juliana, 2013). .....	83
Gambar 57	Ilustrasi 3D (X, Y, Z) teras reaktor HTGR (Pratama, 2018) .....	83
Gambar 58	Data koefisien konduktivitas TRISO (SiC) (Zang, 2022) .....	84
Gambar 59	Distribusi Temperatur pada Lapisan Dalam Kompak Bahan Bakar .....	84
Gambar 60	Distribusi Temperatur pada <i>Coated Fuel Particle</i> .....	84
Gambar 61	Skema <i>burn up</i> CANDU.....	85

Gambar 62	Skema <i>burnup</i> MCANDLE dengan pembagian region bahan bakar pada arah (a) aksial (b) radial (Su'ud and Sekimoto, 2013b; Widiawati et al., 2020b) .....	86
Gambar 63	Faktor multiplikasi tak hingga ( $k_{inf}$ ) untuk pin bahan bakar uranium alam selama 15 tahun pembakaran. ....	88
Gambar 64	Nilai keff untuk reaktor berpendingin 208Pb yang diperkaya dengan ukuran berbeda. ....	89
Gambar 65	Perubahan faktor multiplikasi efektif (keff) untuk 12 siklus pengisian bahan bakar. ....	89
Gambar 66	Konfigurasi Teras arah radial dan axial dengan overview $\frac{1}{4}$ teras aktif.....	90
Gambar 67	Geometri grafit heksagonal dan kanal bahan bakar silinder untuk region teras yang berbeda .....	90
Gambar 68	Comparison of $k$ fuel for JENDL 3.3, JENDL 4.0, ENDF/B-VII.0, and JEFF 3.1 .....	91
Gambar 69	<i>The conversion ratio of 0.80 mol% WGPu fuel with JENDL 3.3, JENDL 4.0, ENDF/B-VII.0, and JEFF 3.1</i> .....	92
Gambar 70	<i>The reactivity with different temperatures for JENDL 3.3, JENDL 4.0, ENDF/B-VII.0, and JEFF 3.1</i> .....	92
Gambar 71	Distribusi kontrol <i>rod</i> pada teras reaktor .....	93
Gambar 72	Skematik aparatus loop sirkulasi alami segi lima sembarang. (Hariyanto, D., 2023) .....	96
Gambar 73	Bentuk fisik aparatus loop sirkulasi alami segi lima sembarang. ....	97
Gambar 74	Transisi fase garam $\text{NaNO}_3$ pada daya (a) 176 W (b) 132 W, dan (c) 95 W; (d) pengaruh daya terhadap $t_M - CM$ dan $T_{CM}/T_M$ . (Hariyanto, D., 2023).....	98
Gambar 75	Hasil pemodelan pemanasan garam campuran eutektik dari $\text{NaNO}_3+\text{KNO}_3$ di dalam aparatus pada daya 95 W (a) perbandingan temperatur hasil pemodelan dengan hasil eksperimen (b) perubahan fraksi massa garam cair (Hariyanto, D., 2023) .....	98
Gambar 76	Suasana pengukuran radiasi alamiah di Kabupaten Mamuju .....	101
Gambar 77	Sampel tanah dan rumput yang diambil di daerah penelitian. ....	102

Gambar 78	Peta laju dosis radiasi Kabupaten Mamuju dari data pengukuran sintilator NaI(Tl) (1m di atas permukaan).....	102
Gambar 79	Multipemanfaatan energi nuklir.....	114
Gambar 80	Produksi Listrik Nuklir (Sumber: World Nuclear Association, IAEA PRIS) (World Nuclear Association, 2022b).....	117
Gambar 81	Produksi Listrik Dunia Berdasarkan Sumber 2019 (Sumber International Energy Agency) (World Nuclear Association, 2022b).....	118
Gambar 82	Total <i>Kapasitas Bersih [GW] dan Produksi Daya Reaktor, 2013-2035</i> (IEA, 2013; Sasakawa Peace Foundation USA, 2015).....	119
Gambar 83	Perkembangan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) ( <i>GIF, 2021; IEA, 2013</i> ).....	120
Gambar 84	Proses Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) ( <i>Encyclopedia Britanica inc, 2022</i> ).....	120
Gambar 85	10 Negara Teratas Yang Sedang membangun Reaktor Nuklir Baru (Bhutada, 2022).....	121
Gambar 86	Keunggulan Kompetitif SMR ( <i>Subki, 2018</i> ).....	123
Gambar 87	Beberapa skenario untuk negara-negara kepulauan (Subki, 2018).....	124
Gambar 88	Beberapa teknologi SMR Land Based (Darat)(Subki, 2018)...	124
Gambar 89	Konsep Reaktor Mikro NuScale (Langdon, 2019).....	125
Gambar 90	Pemanfaatan PLTN dan Karakteristiknya.....	126
Gambar 91	Faktor kapasitas ( <i>Capacity Factor</i> ) berbagai sumber energi (Permana et al., 2022; US EIA, 2015).....	127
Gambar 92	<i>Nuclear power is carbon-free energy</i> (Markandya & Wilkinson, 2007; US DOE, 2021b).....	132
Gambar 93	<i>Comparison of Safest and Cleanest from Various Energy Resources</i> (Ritchie & Roser, 2020b).....	133
Gambar 94	Hasil Inventorisasi Siklus Hidup Produksi Listrik 1 KWh Berkontribusi pada Polusi Udara pada Paparan Partikulat (PM) (Bruckner et al., 2014).....	134
Gambar 95	SDG 7 – Kunci Untuk Semua SDG (World Nuclear Association, 2022a).....	135
Gambar 96	Emisi setara rata-rata siklus hidup CO2 (sumber: IPCC) (World Nuclear Association, 2022a).....	136

Gambar 97	Emisi eutrofikasi siklus hidup pada 2020, dalam unit gram setara Fosfor per MWh (Economic Commission for Europe, 2022) .....	137
Gambar 98	Kontribusi Energi Nuklir di Amerika Serikat (US DOE, 2020b).....	138
Gambar 99	Penggunaan tanah relatif (Tambang Bahan Bakar dan Pembangkit) Opsi Pembangkit Listrik Per Unit Listrik (Brook & Bradshaw, 2015; World Nuclear Association, 2022a).....	139
Gambar 100	Fasilitas Nuklir Berkapasitas 1000 MWe Setara Energi Lain di Amerika Serikat (US DOE, 2021b) .....	140
Gambar 101	Konsumsi Air Per Unit Listrik dan Panas Diproduksi tahun 2008-2012 (Mekonnen et al., 2015; World Nuclear Association, 2022a).....	141
Gambar 102	Konsumsi Bahan Bakar Nuklir dan Bahan Energi lainnya (US DOE , 2021).....	143
Gambar 103	Kontribusi Energi Nuklir Untuk Mengamankan Pasokan Air Bersih, Sanitasi dan Makanan yang dapat di andalkan. (World Nuclear Association, 2022b) .....	144
Gambar 104	Paparan Radiasi Terhadap Publik dari PLTN 1000 MWe (Oludare, 2018) .....	146
Gambar 105	Selama proses konstruksi pada Reaktor Besar dan Modern, ribuan Perkan dibutuhkan. Pada PLTN Hinkley Point C, di butuhkan 8000 Pekerja on-site selama puncak pembangunan (World Nuclear Association, 2022b) .....	147
Gambar 106	Industri Energi Nuklir Berkontribusi Dalam Menciptakan Lapangan Kerja (NEI, 2022).....	148
Gambar 107	Cadangan Uranium dan Thorium Dunia (Ağbulut, 2019).....	149
Gambar 108	Penggunaan Material Untuk Berbagai Sumber Energi (World Nuclear Association, 2022b) .....	150
Gambar 109	Biaya Sistem Jaringan untuk Teknologi <i>dispatchable</i> dan Tebarukan (sumber: OECD Nuclear Energy Agency, 2018) (World Nuclear Association, 2022b) .....	152
Gambar 110	Perbandingan Tingkat pertumbuhan Listrik dan Keberlanjutan Listrik Rendah Karbon (Cao et al., 2016; Thoughtscapism, 2017).....	153

Gambar 111 Perbandingan beberapa aspek ekonomi listrik rendah karbon (Thoughtscapism, 2017).....	154
Gambar 112 Perbandingan <i>Energy Returned on Investment</i> (EROI) Berbagai Energi (Conca, 2015; Weißbach et al., 2013).....	154
Gambar 113 Target Skenario Beberapa Tahap Transisi 2019, 2025 dan 2050 (MEMR, 2021).....	161
Gambar 114 Bauran Teknologi Dalam Kapasitas Produksi Listrik Dalam Skenario NZE 2020-2070 (MEMR, 2021). ....	161
Gambar 115 Komposisi Bauran Energi Setiap Sumber Dalam Skenario <i>Net-Zero</i> 2020-2060 (MEMR, 2021). ....	162
Gambar 116 Komposisi Bauran Pembangkit Listrik Dalam Skenario <i>Net-Zero</i> 2020-2060 (MEMR, 2021).....	162
Gambar 117 Produksi Listrik Berbasis 10 GWe Terpasang Setiap Pembangkit (permana et al., 2022) .....	165
Gambar 118 Kebutuhan Kapasitas Daya Pembangkit Terpasang Untuk Produksi Listrik 1500 TWh (permana et al., 2022) .....	166
Gambar 119 Rasio Kapasitas Daya Pembangkit Terhadap Batu Bara Untuk Produksi 1500 TWh (permana et al., 2022).....	168
Gambar 120 Biaya Investasi (USD/kWe) Teknologi PLTN, Pembangkit Baru .....	170
Gambar 121 Nilai Diskon dan Biaya LCOE Beberapa Negara (USD/MWh) Teknologi PLTN, Pembangkit Baru .....	172
Gambar 122 LCOE Eropa dan Amerika Serikat (USD/MWh) Teknologi PLTN, Pembangkit Baru .....	172
Gambar 123 LCOE Negara-negara Asia (USD/MWh) Teknologi PLTN, Pembangkit Baru .....	173
Gambar 124 Biaya Komponen LCOE (USD/MWh) Teknologi PLTN, Pembangkit Baru .....	174
Gambar 125 Perbandingan harga LCOE (USD/MWh) Tiap Pembangkit Listrik (IEA, 2020).....	175
Gambar 126 Ringkasan Rentang Biaya Operasional dan LCOE Semua Perusahaan Partisipan (USD/MWh).....	176
Gambar 127 Biaya Kapital SMR (USD/KWe) .....	177
Gambar 128 Rentang Biaya Modal SMR (USD/KWe) Semua Perusahaan Partisipan (Energy Options Network, 2018) .....	177

Gambar 129 Rentang biaya kapital, operasional, dan total LCOE SMR (USD/ MWh) semua perusahaan partisipan (Energy Options Network, 2018) .....	178
Gambar 130 Daerah Distribusi Zona Industri di Indonesia (Kemenperin, 2020).....	178
Gambar 131 Daerah Distribusi Zona Industri di Indonesia dan Kebutuhan Listrik. (Kemenperin, 2020)* *Note : Data kebutuhan listrik dan operasional dicantumkan mengacu pada data kemenperin.....	179
Gambar 132 Distribusi 5200 unit PLTD di sekitar 2130 lokasi di Indonesia (PLN, 2021).....	183
Gambar 133 Distribusi Daya Program De-dieselisasi di tiap provinsi di Indonesia. Note : Data (PLN, 2021).....	184
Gambar 134 Gap Suplai Listrik Program NZE 2060 dibandingkan 2021 dan Kontribusi PLTN Note : Data from reference (Setiawan, 2021) and combined with reference (National Energy Council, 2021).....	187
Gambar 135 Persentase kebutuhan listrik tiap provinsi di Indonesia .....	188
Gambar 136 Komposisi kebutuhan listrik tiap provinsi tahun 2060 untuk total 1800 TWh.....	188
Gambar 137 Komposisi kontribusi Listrik PLTN (18%) pada Program NZE 2060.....	189
Gambar 138 Kebutuhan kapasitas terpasang untuk kontribusi PLTN (18%) pada Program NZE [GWe] .....	189
Gambar 139 Potensi Energi Terbarukan di Indonesia [GWe].....	191
Gambar 140 Potensi produksi listrik energi terbarukan di Indonesia [TWh] .....	192
Gambar 141 Persentase pemanfaatan potensi energi terbarukan di Indonesia [GWe] .....	192
Gambar 142 Persentase pemanfaatan listrik energi terbarukan di Indonesia [TWh] .....	193
Gambar 143 Gap listrik berdasarkan pada persentase pemanfaatan energi terbarukan [TWh] .....	194
Gambar 144 Gap listrik berdasarkan pada beberapa persentase pemanfaatan energi terbarukan .....	195
Gambar 145 Peta jalan tahapan implementasi PLTN Program NZE 2060 Indonesia.....	202



Gambar 146	Peta kebutuhan listrik tiap pulau untuk pemanfaatan PLTN di 2060 Program NZE .....	203
Gambar 147	Gap listrik berdasarkan pemanfaatan energi terbarukan.....	206
Gambar 148	Energi [TWh] dan persentase suplai fosil terhadap nuklir untuk pemenuhan gap energi [%] .....	207
Gambar 149	Energi [TWh] dan persentase fosil dan energi terbarukan terhadap nuklir untuk pemenuhan gap energi [%].....	208



# DAFTAR TABEL

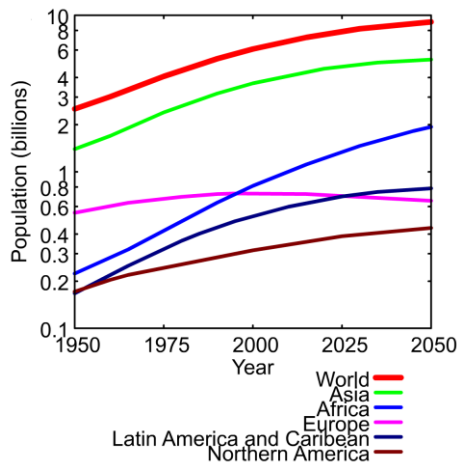
Tabel 1.	Daftar 10 besar permasalahan Manusia untuk 50 tahun ke depan.....	4
Tabel 2.	Properti Material Isotop Plutonium (Pellaud, 2002).....	67
Tabel 3	Parameter desain teras reaktor .....	87
Tabel 4	Sifat fisika dan kimia beberapa pendingin ( $T = 700K$ ) .....	87
Tabel 5	Faktor puncak daya untuk semua reaktor dalam arah radial .....	89
Tabel 6	Parameters dasar daya 100 MWe <i>Molten Salt Reactor</i> .....	90
Tabel 7	Koefisien temperatur <i>Moderator coefficient</i> (MTC) dan Koefisien reaktivitas Doppler (DRC) reaktor reaktor untuk pustaka nuklir yang berbeda .....	93
Tabel 8	Nilai Initial <i>keff</i> , reaktivitas, dan <i>Doppler reactivity coefficient</i> (DRC) untuk model teras reaktor yang berbeda .....	93
Tabel 9	Biaya Komponen dan LCOE Beberapa Negara : Pembangkit Baru.....	171
Tabel 10	Daftar peserta survei dari tipe reaktor dan kapasitas daya berbeda.....	176
Tabel 11	Ringkasan biaya dari semua perusahaan partisipan.....	176
Tabel 12	Pengembangan Zona Industri di Indonesia dan Distribusinya 2014 (Kemenperin, 2020).....	180
Tabel 13	Pengembangan Zona Industri di Indonesia dan Distribusinya 2019 (Kemenperin, 2020).....	180
Tabel 14	Daftar Kebutuhan Infrastruktur Listrik Untuk Zona Industri di Indonesia (Kemenperin, 2020) .....	180
Tabel 15	Daftar Kebutuhan Infrastruktur Listrik Untuk Zona Industri di Indonesia PrograM Non RPJMN (Kemenperin, 2020).....	181
Tabel 16	Daftar rentang dan tipe reaktor daya zona industri .....	182
Tabel 17	Daftar kebutuhan infrastruktur listrik untuk daerah de-dieselisasi di indonesia .....	185
Tabel 18	Daftar rentang dan tipe reaktor daya program de-dieselisasi ...	185
Tabel 19	Daftar kebutuhan listrik dan unit PLTN yang dibutuhkan setiap pulau .....	204



# 1. ENERGI, LINGKUNGAN, DAN MANUSIA

## 1.1 Kebutuhan Energi Dunia

Pertambahan penduduk dunia akan terus meningkat dan diperkirakan akan menembus angka 9 miliar orang pada tahun 2050 seperti digambarkan pada **Gambar 1** (President's meeting of G8 countries, 2006). Kontribusi terbanyak berasal dari Benua Asia terutama Cina dan India, kemudian disusul oleh Indonesia. Penduduk Afrika juga mengalami kenaikan signifikan setelah tahun 2000-an dan telah melewati jumlah penduduk Eropa. Penduduk Eropa mengalami penurunan jumlah penduduk pada periode tahun 2000-an dan penduduk benua lainnya cenderung terus menerus mengalami kenaikan.

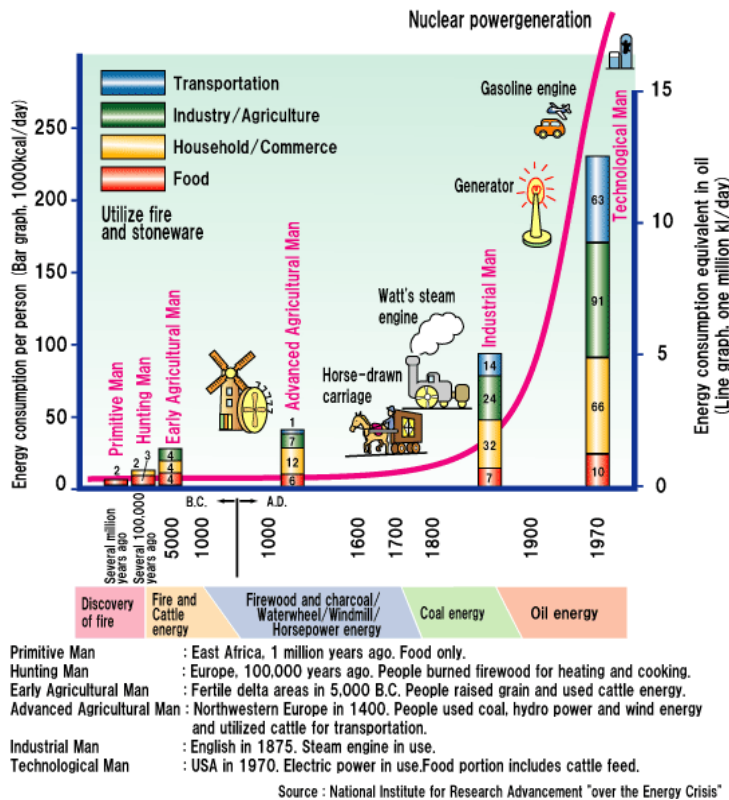


Sumber: Presented paper of Contribution of Coal and Nuclear to Sustainable Energy Supply: Perspectives and Problems, President's meeting of G8 countries, Brazil, China, India and South Africa, Moscow 2006

Gambar 1 Perkiraan penduduk dunia

Ledakan penduduk yang terjadi di atas khususnya terjadi pada negara-negara berkembang yang lambat laun negara-negara tersebut akan mengalami pergeseran konsumsi penduduknya baik dari segi konsumsi makanan, energi, dan lainnya. Pergeseran status negara berkembang ke negara maju dengan penduduk yang relatif tinggi mengakibatkan kenaikan yang cukup signifikan permasalahan makanan, air, lingkungan dan terutama energi yang pada saatnya nanti akan terjadi satu kondisi kekurangan pasokan pangan dari dalam negeri dan pada akhirnya akan menaikkan permintaan suplai dari luar berupa impor berbagai kebutuhan hajat hidup orang banyak

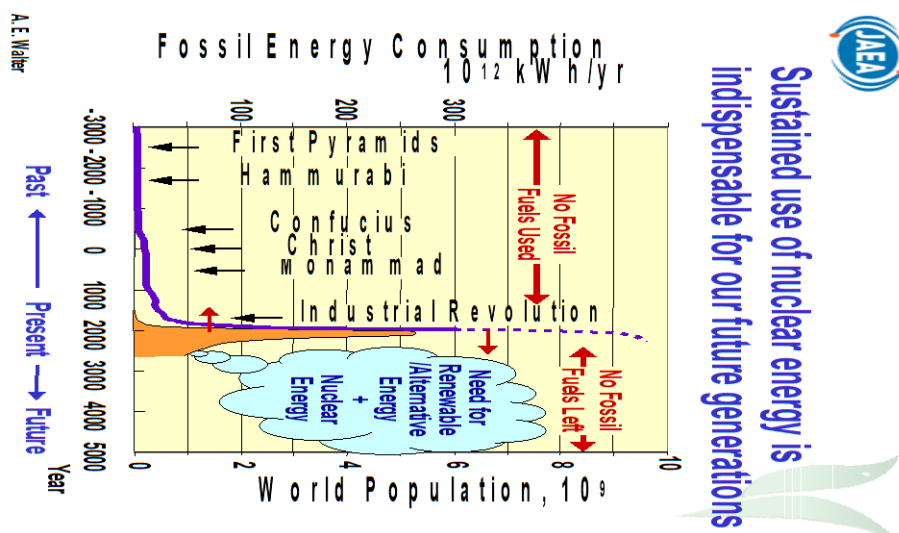
diberbagai negara tersebut. Pola hidup dan konsumsi negara maju atau negara berkembang yang bergerak ke arah negara industri akan mengalami kenaikan signifikan akan energi terutama masalah kelistrikan. Hampir semua perkakas, peralatan dan fasilitas kehidupan senantiasa memerlukan listrik, yang pada gilirannya semua akan sangat bergantung pada listrik. Kendaraan juga akan sangat bergantung pada minyak atau bahan pengganti lainnya sementara jumlah cadangan sumber daya alam semakin menipis.



**Gambar 2** Sejarah penggunaan energi manusia

Berdasarkan fase kehidupan manusia di bumi yang berkaitan dengan pemanfaatan dan konsumsi energi penduduk dunia, akan terlihat perbedaan yang signifikan terutama jenis teknologi dan volume konsumsi energi sebelum dan setelah adanya revolusi industri, seperti yang digambarkan pada **Gambar 2**, yang berkaitan dengan sejarah dan fase pemanfaatan energi manusia dan juga bentuk teknologi dan sumber daya alam yang digunakan. Fase-fase generasi manusia telah mengalami kenaikan signifikan terutama pada pemanfaatan makanan, rumah tangga, industri dan transportasi setelah

diketemukannya mesin uap James Watt yang telah mengubah wajah dunia menjadi dunia industri terutama di negara-negara barat. Setelah itu diketemukannya sumber daya alam berupa batu bara yang dengan cepat dimanfaatkan untuk keperluan mesin, transportasi dan listrik, kemudian minyak bumi juga dimanfaatkan untuk keperluan hidup manusia, diikuti dengan sumber daya energi lainnya sampai pada pertengahan abad ke-20 dengan pemanfaatan energi nuklir untuk listrik dan keperluan lainnya. Kemudian diikuti dengan pemanfaatan energi terbarukan dan juga pengembangan energi-energi baru atau energi sebelumnya yang di-upgrade menjadi lebih efisien, lebih saman, lebih ekonomis dan lebih sedikit kadar kandungan emisi rumah kaca nya sertasedikit limbahnya.



Sumber : Tomio KAWATA, Executive Officer Japan Atomic Energy Agenc (JAEDA), Global 2005, October 10 – 13, 2005, Tsukuba, Japan

**Gambar 3** Pemanfaatan energi nuklir dan terbarukan di abad 20

Seperti dijelaskan sebelumnya, kenaikan konsumsi energi secara signifikan terjadi setelah era industrialisasi terjadi dan ledakan konsumsi energi fosil yang luar biasa dengan keterbatasan sumber daya alam yang ada mengakibatkan manusia berpikir untuk mencari alternatif energi di antaranya energi terbarukan dan juga energi nuklir seperti terlihat dalam **Gambar 3**. Selain kedua energi tersebut diprediksi dapat menggantikan kebutuhan energi fosil dunia terutama untuk kebutuhan listrik dunia, kedua energi itu dapat mengurangi beban bumi ini akibat rusaknya ekosistem lingkungan terutama akibat pemanasan global yang disebabkan oleh emisi

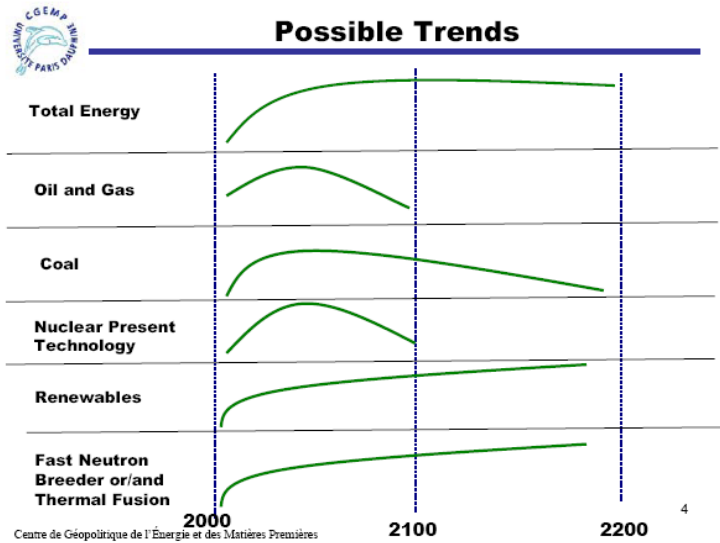
gas rumah kaca dari sumber-sumber energi fosil dan aktivitas manusia dan pemukiman penduduk akibat pengebangan hutan dan lainnya. Pengurangan konsumsi energi fosil akibat berkurangnya sumber daya yang tersedia maupun dalam upaya mengurangi gas rumah kaca terutama gas CO<sub>2</sub>, perlu dipertimbangkan lebih jauh dan pemanfaatan energi-energi baru seperti energi nuklir dan pemanfaatan energi terbarukan telah menjadi bagian dari kebijakan bauran energi negara-negara industri khususnya dalam rangka memenuhi kebutuhan energi mereka yang sebagian besar dari negara-negara tersebut mempunyai industri-industri besar dan memerlukan konsumsi energi yang demikian besar. Persoalan-persoalan ke depan yang perlu dihadapi oleh penduduk bumi saat ini telah menjadi perhatian tersendiri terutama bagi penggiat energi dan lingkungan dalam rangka memenuhi tuntutan perkembangan dunia dan juga tren gaya hidup yang terjadi akibat semakin modernnya era teknologi dan banyaknya negara-negara industri baru bermunculan. Berdasarkan pengamatan Richard Smalley yang merupakan salah satu penerima hadiah Nobel Laureate (Bidang Kimia, 1996), beliau memaparkan bahwa ada 10 permasalahan dunia teratas dalam jangka waktu 50 tahun ke depan dan energi menjadi menjadi permasalahan utama dibandingkan permasalahan lainnya seperti dijelaskan pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Daftar 10 besar permasalahan Manusia untuk 50 tahun ke depan

Table 1
<u>Richard Smalley's linkage of energy to the cure of social problems (Smalley)</u>
Richard Smalley Nobel Laureate (Chemistry 1996) – "Energy Can Help Solve Most of Them!"
<i>Humanity's top ten problems for next 50 years</i>
Energy
Water
Food
Environment
Poverty
Terrorism & war
Disease
Education
Democracy
Population

Sumber : D. Lewis / Progress in Nuclear Energy 50 (2008) 394-401



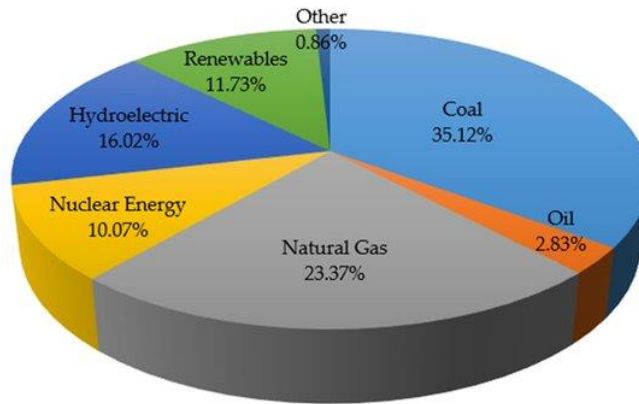


**Sumber:** Presented paper of Contribution of Coal and Nuclear to Sustainable Energy Supply: Perspectives and Problems, President's meeting of G8 countries, Brazil, China, India and South Africa, Moscow 2006

**Gambar 4** Profil kebutuhan dan konsumsi energy dunia dari tahun 2000.

Prioritas permasalahan energi menjadi nomor satu dibandingkan dengan permasalahan air, makanan, bahkan lingkungan, demokrasi, dan jumlah penduduk. Begitu pentingnya energi dalam pemenuhan hajat manusia dewasa ini, berbagai negara mencoba mencari dan mengeksplorasi lahan-lahan bahan baku energi dalam negerinya, dan juga mencari sumber-sumber energi baru dari negara lainnya sebagai impor bahan baku energi. Ada pula dengan perebutan bahan baku energi ini tidak sedikit terjadi peperangan atau menyulut sengketa negara-negara bertetangga yang tentunya menjadi konflik yang cukup rumit dan dapat berkepanjangan. Sehingga dapat memunculkan sebuah slogan *siapa yang menguasai energi dialah yang menguasai dunia*, atau dapat juga menjadi slogan Richard Smalley yaitu *"Energy Can Help Solve of Them"* atau energi dapat membantu memberi solusi bagi yang lainnya". Kebutuhan akan energi seperti diungkapkan sebelumnya, berakibat pada semakin menipisnya cadangan sumber daya alam yang ada di bumi sehingga akan menurunkan juga jumlah konsumsi energy dunia dalam perjalanan waktu ke depan. Profil konsumsi dan cadangan sumber daya energi dunia diprediksi akan mengalami kekurangan atau relatif naik dan stabil untuk beberapa sumber energi seperti digambarkan pada **Gambar 4** terkait profil berbagai tren konsumsi energi berbagai sumber bahan bakar energi. Gas dan minyak

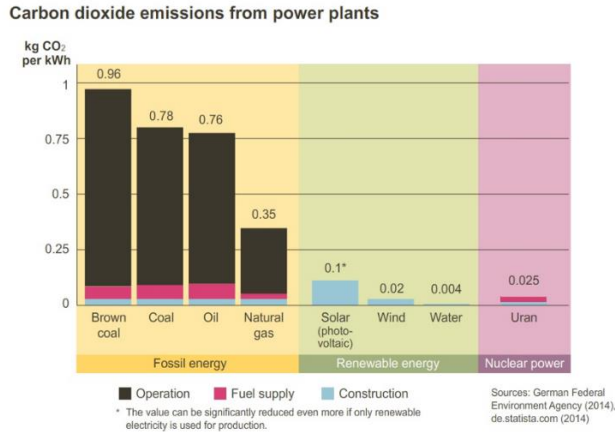
bumi akan mengalami penurunan begitu pula dengan batu bara dan juga nuklir.



**Sumber:** Citation: Supapo, K.R.M.; Lozano, L.; Tabañag, I.D.F.; Querikiol, E.M. A Geospatial Approach to Energy Planning in Aid of Just Energy Transition in Small Island Communities in the Philippines. Appl. Sci. 2021, 11, 11955. [https:// doi.org/10.3390/app112411955](https://doi.org/10.3390/app112411955)

**Gambar 5** Komposisi konsumsi energi listrik dunia tahun 2021

Dikarenakan minyak bahan bakar fosil berupa minyak, gas, dan batu bara tersebut tidak dapat diperbaharui dan juga tidak dapat didaur ulang, maka akan hilang dengan sendirinya setelah semua cadangan energi fosil tersebut dikonsumsi. Sementara itu energi nuklir dengan teknologi saat ini dan tanpa daur ulang bahan bakar, akan mengalangi penyusutan sumber bahan bakarnya apabila tidak ada eksploasi yang baru. Akan tetapi dengan adanya terkonologi daur ulang, ditambah juga terkonologi reaktor pembiak cepat yang dapat menghasilkan bahan bakar baru dalam waktu yang bersaan ditambah juga dengan pemanfaatan thorium dan teknologi nuklir fusi, maka tren energinya akan serupa dengan kemampuan *sustainability* bahan baku dari energi terbarukan. Seperti yang bisa dilihat dalam **Gambar 5** untuk komposisi konsumsi energi listrik dunia saat ini, terlihat bahwa konsumsi energi fosil untuk produksi listrik masih di atas 60% (batu bara, minyak, dan gas alam) kemudian disusul energi hidro 16%, energi terbarukan 11.7% dan nuklir 10%, dan lainnya. Komposisi pemanfaatan listrik dari data tersebut menggambarkan energi listrik dunia masih bergantungnya dari bahan bakar fosil dan sisanya konsumsi energi dari energi baru dan terbarukan.



Sumber: <https://medienportal.siemens-stiftung.org/en/carbon-dioxide-emissions-from-power-plants-102065>

**Gambar 6** Komposisi Emisi Gas CO<sub>2</sub> dari berbagai jenis pembangkit (Carbon Dioxide Emissions from Power Plants | The Siemens Stiftung Media Portal, 2019)

## 1.2 Efek terhadap Lingkungan dari Pemanfaatan Energi Dunia

Sebagai akibat dari masih bergantungnya penduduk dunia dalam memenuhi kebutuhan energinya pada bahan bakar fosil, efek yang nyata terjadi dan sudah terasa dampaknya adalah efek pemanasan global yang berasal dari emisi gas rumah kaca khususnya gas buang CO<sub>2</sub>. **Gambar 6** menggambarkan jumlah emisi gas CO<sub>2</sub> dari berbagai jenis pembangkit yang sudah digunakan manusia dalam memenuhi kebutuhan energinya yang berasal dari pembakaran bahan bakar secara langsung dan juga gas CO<sub>2</sub> yang dikeluarkan melalui proses lainnya dari fasilitas pembangkit dan operasional pembangkit dalam satuan kg CO<sub>2</sub> per kWh (*kilo watt hour*). Pembangkit yang mengeluarkan emisi gas CO<sub>2</sub> yang berasal dari pembakaran bahan bakar dan proses operasional dan pemrosesan lainnya di fasilitas terkait pembangkit berasal dari pembangkit dengan bahan bakar fosil seperti batu bara coklat (Brown), batu bara sebagai pembangkit paling banyak menghasilkan gas buang CO<sub>2</sub> kemudian minyak bumi dan gas alam. Sementara pembangkit lainnya yang masuk dalam kategori energi rendah karbon dari energi terbarukan dan energi nuklir tidak mengeluarkan CO<sub>2</sub> yang berasal dari bahan bakar langsung, akan tetapi CO<sub>2</sub> masih dikeluarkan dalam jumlah yang relatif kecil dari proses operasi, konstruksi, dan lainnya. Pembangkit-pembangkit tersebut berasal dari bahan bakar energi baru dan terbarukan seperti nuklir, sel surya, angin, geothermal, dan air.

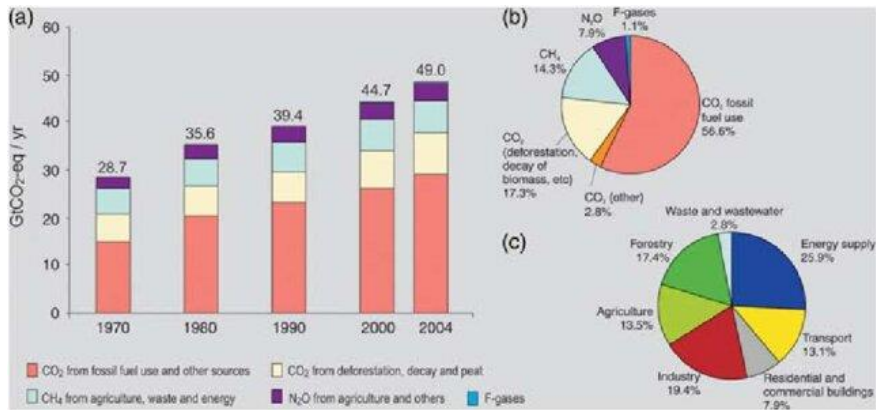
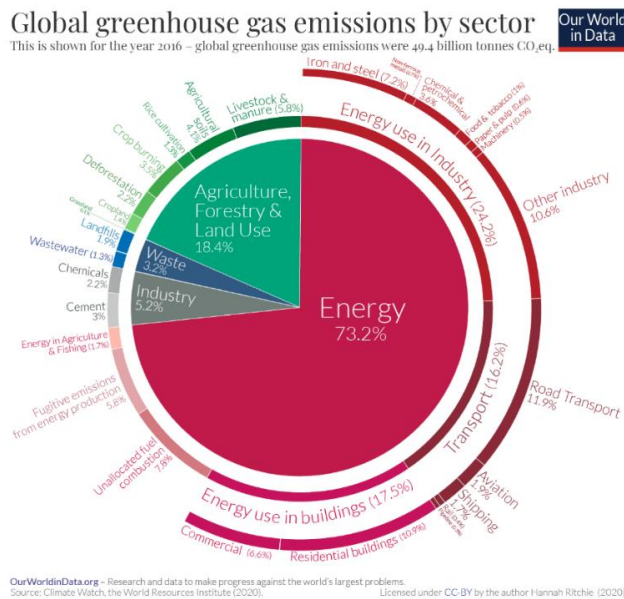


Figure (a) Global annual emissions of anthropogenic green house gases (GHGs) from 1970 to 2004.5, (b) share of different anthropogenic GHGs in total emissions in 2004 in terms of CO<sub>2</sub>-eq and (c) 100 shares of different sectors in total anthropogenic GHG emissions in 2004 in terms of CO<sub>2</sub>-eq (forestry includes deforestation) (Source: IPCC, 2007a, Synthesis report).

**Gambar 7** Emisi gas rumah kaca yang di keluarkan dari berbagai jenis aktivitas manusia.



**Gambar 8** "Sektor demi sektor : Dari Mana Asal Emisi Gas Rumah Kaca Global?" (Ritchie & Roser, 2020a)

Dari perbandingan gas CO<sub>2</sub> pada Gambar 6 tersebut, dapat diperkirakan bahwa penyumbang terbesar dalam setiap operasi pembangkit dalam pemanasan global berasal dari berbagai jenis pembangkit yang berasal dari pembangkit berbahan bakar fosil dikarenakan secara langsung proses pembakaran bahan bakar fosil tersebut dapat menghasilkan gas CO<sub>2</sub> yang terbuang langsung ke atmosfer dalam jumlah yang besar. Sedangkan

pembangkit energi baru dan terbarukan tidak menghasilkan emisi gas CO<sub>2</sub> dari proses pembakaran bahan bakar secara langsung, tetapi dari proses operasional pembangkit, transportasi, pembangunan pembangkit dan lainnya. Setiap tahun emisi gas rumah kaca yang berakibat pada pemanasan global terus menerus mengalami kenaikan secara signifikan seperti digambarkan pada **Gambar 7**. Selain jumlah emisi gas rumah kaca semakin meningkat setiap tahunnya, terlihat bahwa kontributor terbanyak sekitar 60% gas rumah kaca berasal dari gas CO<sub>2</sub> yang berasal dari bahan bakar fosil, diikuti oleh pembuangan gas CO<sub>2</sub> yang berasal dari deforestasi, biomas dan lainnya. Sementara gas CO<sub>2</sub> yang dikeluarkan dari berbagai aktivitas manusia, CO<sub>2</sub> yang dikeluarkan dari proses pembangkit atau suplai energi atau lebih dari 25% sebagai komposisi tertinggi, sementara industri berkontribusi sekitar 20%, diikuti oleh kehutanan dan pertanian, transportasi dan lainnya, termasuk di dalamnya kegiatan rumah tangga. **Gambar 8** memperlihatkan komposisi lebih detail dari sektor mana saja penyumbang emisi gas rumah kaca. Sektor energi penyumbang sekitar 73% emisi diikuti pertanian, kehutanan dan penggunaan lahan, kemudian industri kimia dan semen dan sampah. Dari sektor industri diketahui terdiri atas banyak subsektor dan yang paling banyak penggunaan energi di industri kemudian bangunan dan transportasi.

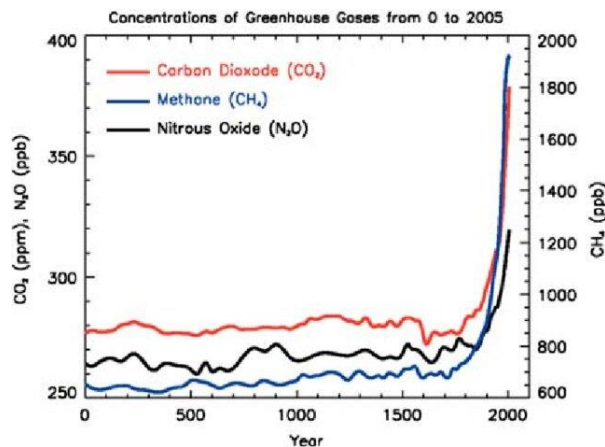
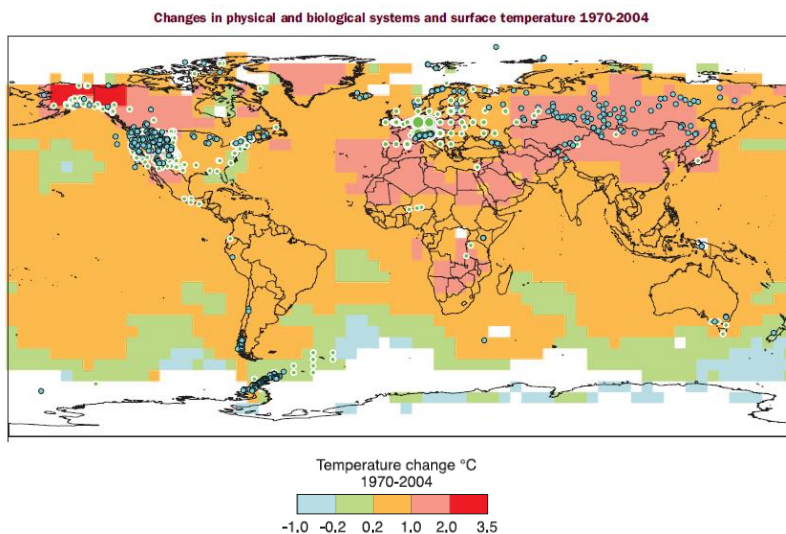


Figure : Atmospheric concentrations of important long-lived greenhouse gases over the last 2000 years. Increases since about 1750 are attributed to human activities in the industrial era. Concentration units are parts per million (ppm) or parts per billion (ppb) (Source: IPCC, 2007a, Chapter 2)

**Gambar 9** Konsentrasi emisi gas rumah kaca di atmosfer sepanjang 2000 tahun (IPCC, 2007)

Dengan demikian setiap aktivitas manusia dapat berkontribusi bagi pemanasan global dengan porsinya masing-masing. Proses pembangkitan energi menjadi *concern* tersendiri dikarenakan proses ini berkontribusi terbanyak bagi pemanasan global yang secara cukup efektif bisa dikontrol gas buangnya apabila bisa dipilih jenis bahan bakar atau manajemennya agar tidak menghasilkan atau berkurangi gas rumah kacanya langsung ke atmosfer. Konsentrasi gas rumah kaca dari jenis CO<sub>2</sub>, Methana dan NO<sub>x</sub> mengalami kenaikan yang cukup signifikan mulai dari awal abad 19 dan sampai saat ini eksponensial naik. Dibanding sebelum masa revolusi industri, seperti ditunjukkan pada **Gambar 9**. Hal ini sangat mengkhawatirkan karena komponen gas rumah kaca (GRK) serentak mengalami kenaikan signifikan yang berakibat pada kenaikan temperatur rata-rata bumi kita.

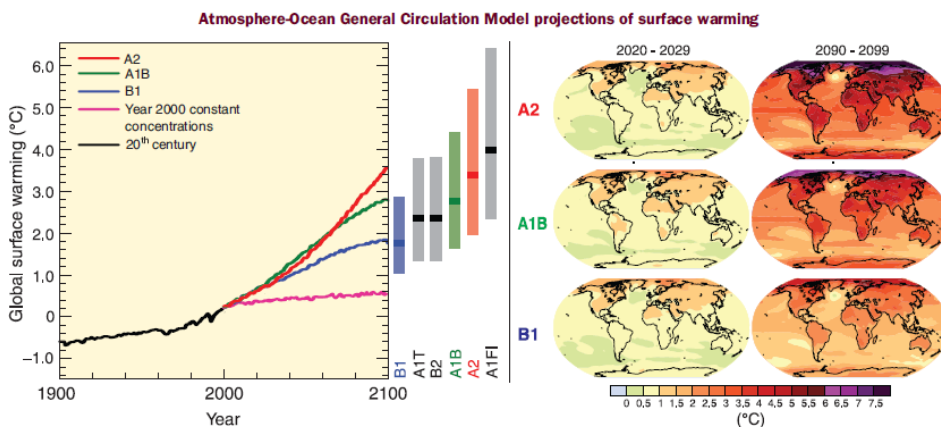


**Sumber :** An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change, This underlying report, adopted section by section at IPCC Plenary XXVII (Valencia, Spain, 12-17 November 2007), represents the formally agreed statement of the IPCC concerning key findings and uncertainties contained in the Working Group contributions to the Fourth Assessment Report.

**Gambar 10** Perubahan suhu permukaan bumi dari tahun 1970-2004

Bumi semakin panas dan bisa terlihat dari perbedaan suhu permukaan bumi di berbagai daerah di dunia ini sebagai akibat dari perubahan suhu akibat dari efek rumah kaca yang terjadi selama beberapa dekade ke belakang sampai dekade saat ini. Seperti terlihat pada **Gambar 10**, suhu permukaan bumi bervariasi bergantung pada daerahnya. Negara-negara industri secara umum mengalami kenaikan suhu permukaan antara 1.0 – 2.0 C, sementara negara lainnya termasuk Indonesia mengalami perubahan antara 0.2 - 1.0 C.

Sedangkan daerah dengan perubahan suhu permukaan tertinggi sampai mencapai 3 C berada pada daerah Alaska dengan komposisi daratan es yang banyak terhampar dan dengan perubahan suhu tersebut beberapa daerah di kawasan tersebut mencair dan permukaan esnya mengalami penyusutan. Seperti terlihat pada **Gambar 11** diperkirakan kenaikan suhu permukaan bisa mencapai maksimum lebih dari 7% dalam kurun waktu 2100 mendatang apabila tidak ada upaya signifikan untuk menekan jumlah gas rumah kaca tersebar ke atmosfer dalam jumlah besar saat ini dan diperkirakan akan semakin bertambah banyak karena proses industrialisasi negara berkembang dengan cepat berkembang dan masih bergantungnya pembangkit energi pada bahan bakar fosil. Berbagai kebutuhan saat ini diberbagai negara terkait sumber daya energi telah membuat berbagai negara berupaya untuk "berburu" sumber daya alam yang bias dimanfaatkan untuk energi termasuk di dalamnya energi dari bahan bakar fosil, energi nuklir sampai pada pemanfaatan sumber daya energi terbarukan.



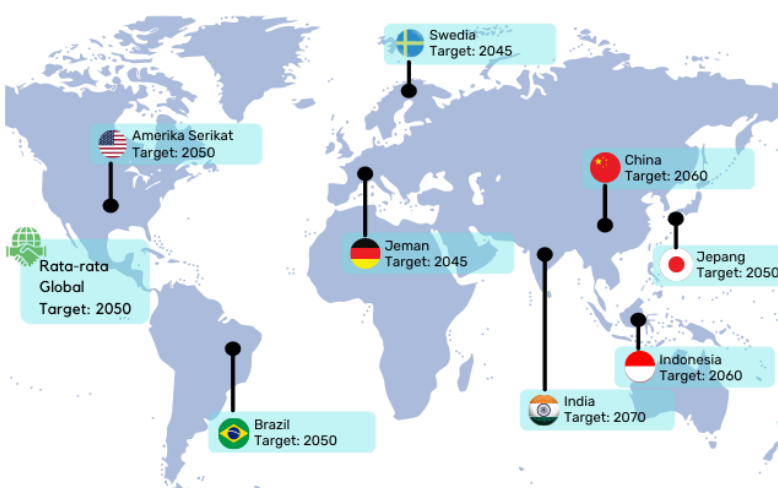
An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change, this underlying report, adopted section by section at IPCC Plenary XXVII (Valencia, Spain, 12-17 November 2007), represents the formally agreed statement of the IPCC concerning key findings and uncertainties contained in the Working Group contributions to the Fourth Assessment Report.

**Gambar 11** Perkiraan perubahan suhu permukaan bumi sampai 2100

Dalam dekade terakhir ini telah terjadi kenaikan harga minyak yang begitu signifikan dan munculnya beragam kebergantungan barang akan impor berupa bahan bakar energi disertai sumber daya alam yang semakin menipis dan ditambah lagi aspek lingkungan yang juga ikut rusak akibat eksploitasi sumber daya energi terutama masalah efek rumah kaca yang lambat laun membuat masyarakat dunia lebih berpikir dua kali dalam

pengelolaan energi sehingga menjadikan manusia mengolah dan memanfaatkan energinya dapat lebih arif dan bijaksana. Lebih jauh lagi dapat secara lebih mendalam untuk menentukan pilihan energi yang dapat memenuhi tuntutan kebutuhan baik jangka pendek, menengah maupun jangka panjang, dan disaat bersamaan energi tersebut bisa ramah dengan lingkungan.

### Target Penerapan Net Zero Emission di Sejumlah Negara



Sumber: Visualcapitalist.com 2021, diolah.

Sumber : <https://reforminer.com/wp-content/uploads/2022/10/2-1.png>

**Gambar 12** Target NZE masing-masing negara di dunia yang bervariasi

### 1.3 Program Net Zero Emission Dunia

Skenario Emisi Nol Bersih pada tahun 2050 (Skenario NZE) adalah skenario normatif yang menunjukkan jalur bagi sektor energi global untuk mencapai nol emisi CO<sub>2</sub> pada tahun 2050, dengan negara-negara maju mencapai nol emisi bersih lebih dulu dibandingkan negara-negara lain. Seperti tampak pada **Gambar 12** yang menunjukkan target penerapan program NZE masing-masing negara yang berbeda-beda, tetapi secara umum rata-rata pada sekitar tahun 2050. Ada target NZE yang lebih cepat, yaitu negara di Eropa seperti Swedia dan Jerman, sementara ada juga yang menargetkan NZE mereka di tahun 2070 seperti India. Sedangkan Indonesia program NZE-nya tercapai di 2060 seperti halnya Cina.

Skenario NZE ini juga memenuhi Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) terkait energi, khususnya akses energi universal pada tahun 2030 dan



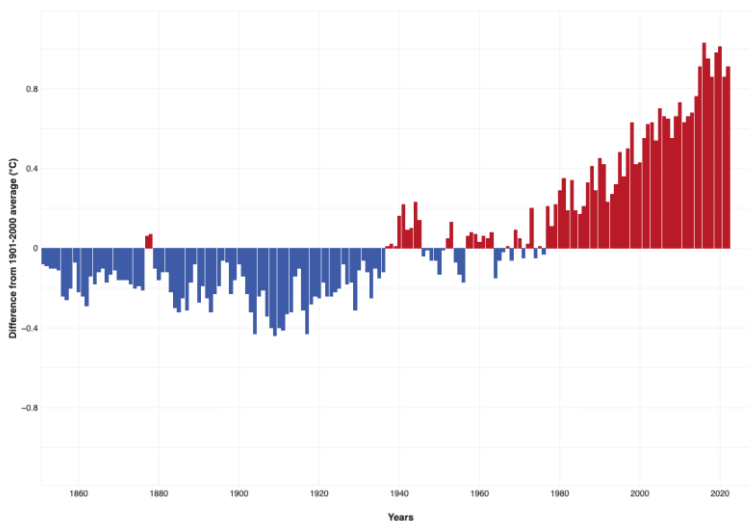
peningkatan besar dalam kualitas udara. Hal ini konsisten dengan upaya membatasi kenaikan suhu global hingga 1,5 °C (dengan probabilitas setidaknya 50%), sejalan dengan pengurangan emisi yang dinilai dalam Panel Antarpemerintah tentang Perubahan Iklim (IPCC) (IEA, 2023).

Skenario Emisi Nol Bersih 2023 pada tahun 2050 (IEA, 2023):

1. Menjelaskan jalur bagi sektor energi global untuk mencapai emisi karbon nol bersih pada tahun 2050 dengan menerapkan portofolio teknologi energi ramah lingkungan yang luas, tanpa diimbangi dengan upaya penggunaan lahan. Keputusan mengenai penerapan teknologi didorong oleh biaya, kematangan teknologi, kondisi pasar, infrastruktur yang tersedia, dan preferensi kebijakan.
2. Mengakui bahwa pencapaian emisi CO<sub>2</sub> sektor energi nol bersih pada tahun 2050 bergantung pada upaya kerja sama global yang adil dan efektif. Jalan menuju emisi nol bersih pada tahun 2050 sangatlah sempit. Semua negara perlu berkontribusi untuk memberikan hasil yang diinginkan; negara-negara maju memimpin dan mencapai emisi nol bersih lebih awal Skenario NZE dibandingkan negara *emerging market* dan negara berkembang. Akses global terhadap listrik dan kebersihan memasak tercapai pada tahun 2030 sejalan dengan SDGs yang telah ditetapkan. Pengurangan emisi metana secara cepat dan besar dari sektor minyak, gas, dan batu bara membantu memberikan waktu bagi pengurangan CO<sub>2</sub> yang tidak terlalu mendadak di pasar negara berkembang dan negara-negara berkembang. Kolaborasi global memfasilitasi pengembangan dan adopsi hal-hal yang ambisius kebijakan, menurunkan biaya teknologi ramah lingkungan, dan meningkatkan rantai pasokan global yang beragam dan tangguh mineral penting dan teknologi energi bersih. Peningkatan dukungan keuangan untuk pasar negara berkembang dan negara-negara berkembang memainkan peran penting dalam kolaborasi ini.
3. Mengutamakan transisi secara teratur yang bertujuan menjaga keamanan energi melalui upaya yang kuat dan terkoordinasi kebijakan dan insentif yang memungkinkan oleh semua aktor mengantisipasi perubahan cepat yang diperlukan, dan meminimalkan energi volatilitas pasar dan aset terlantar. Skenario ini didukung oleh analisis rinci mengenai waktu tunggu proyek untuk pasokan mineral dan teknologi energi bersih sebagai bagian dari upaya untuk memastikan kelayakannya pengapliasiannya.

Dalam beberapa tahun terakhir, sektor energi bertanggung jawab atas sekitar tiga perempat emisi GRK global. Mencapai emisi CO<sub>2</sub> yang terkait dengan energi dan proses industri pada tahun 2050 dalam Skenario NZE tidak bergantung pada tindakan di luar sektor energi, namun membatasi perubahan iklim memerlukan tindakan seperti itu. Oleh karena itu kami juga mengkaji pengurangan emisi CO<sub>2</sub> dari penggunaan lahan yang sepadan dengan transformasi sektor energi dalam Skenario NZE, bekerja sama dengan International Institute for Applied Analysis Sistem (IIASA).

GLOBAL AVERAGE SURFACE TEMPERATURE



Keterangan : Suhu permukaan tahunan dibandingkan dengan rata-rata suhu abad 20 rentang tahun 1880–2022. Warna biru menunjukkan periode tahun yang lebih dingin dari rata-rata, kemudian garis merah menunjukkan periode tahun yang lebih hangat dari rata-rata. Grafik NOAA Climate.gov, berdasarkan data dari Pusat Informasi Lingkungan Nasional (National Centers For Environmental Information).

**Gambar 13** Rata-rata perbedaan temperature permukaan tahun 1880-2022

Berdasarkan data temperatur permukaan tahunan rata-rata dari tahun 1880-2022 yang diperlihatkan pada **Gambar 13**, bahwa kenaikan rata-rata suhu permukaan global sebesar 2 derajat Fahrenheit (1 derajat Celcius) yang terjadi sejak era pra-industri (1880-1900) sampai saat ini mungkin tampak kecil, akan tetapi perubahan kecil itu mempunyai arti bahwa peningkatan akumulasi panas yang signifikan yang terus menerus. Signifikansi perubahan secara global dapat dilihat bahwa secara global ukuran dan kapasitas panas lautan secara global sangat besar, sehingga untuk terjadinya perubahan diperlukan sejumlah besar energi panas untuk menaikkan suhu permukaan rata-rata tahunan bumi secara global, meskipun dalam jumlah kecil hasil

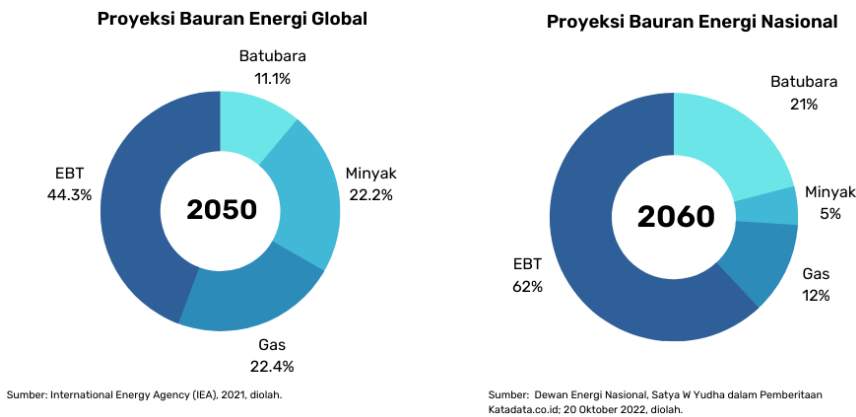
perubahannya. Akibat terjadinya perubahan panas berlebih tersebut dapat menyebabkan suhu ekstrem secara regional dan musiman, kemudian dapat terjadinya kurangnya tutupan salju dan es laut di beberapa kawasan, peningkatan curah hujan lebat, dan perubahan habitat bagi tanaman dan hewan, sehingga terjadi perubahan yang memperluas sebagian wilayah dan menyusutkan wilayah lainnya.

#### **1.4 Program *Net Zero Emission* Indonesia**

Sebagai komunitas global, Indonesia ikut turut serta dalam program global *Net Zero Emission* (NZE) yang tentunya tiap negara mengacu pada startegi nasional dan implementasinya masing-masing untuk program tersebut. Program *Net Zero Emission* (NZE) atau emisi nol bersih ditetapkan pemerintah dalam rangka implementasi komitmen nasional sebagai komunitas global untuk menggunakan energi bersih atau rendah emisi karbon yang mengacu pada komitmen internasional, yaitu berasal dari Perjanjian Paris yang diikuti dan ditandatangani serta diratifikasi oleh 164 pemerintah di seluruh dunia termasuk Pemerintah Indonesia. Komitmen tersebut dilakukan setiap negara khususnya Indonesia dalam rangka menunjukkan kebijakannya yang kuat untuk mengurangi efek gas rumah kaca (GRK) di dalam negeri dan juga dalam rangka ikut berpartisipasi dalam kawasan sekitar serta kontribusi pada target dunia dalam mengurangi efek gas rumah kaca. Program NZE yang dicanangkan dengan mengacu pada pemanfaatan energi rendah karbon mengadopsi kebijakan pemanfaatan energi baru dan terbarukan (EBT). Selain itu dalam implementasinya, pemerintah Indonesia juga berkomitmen untuk meningkatkan pengembangan transportasi bersih dan hijau serta mengurangi laju deforestasi atau pengundulan hutan dan mengikutsertakan program pemanfaatan teknologi untuk peningkatan penangkapan GRK di Indonesia.

Pemerintah Indonesia telah mencanangkan peta Jalan (*Roadmap*) program nol emisi CO<sub>2</sub> (*zero net CO<sub>2</sub> emission*) 2060 dalam hal ini dikomandoi oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) dalam upaya memenuhi kebutuhan energi nasional dan mengadopsi program emisi nol bersih CO<sub>2</sub> NZE pada tahun 2060 sebagai bagian dari program ambisius pemerintah dalam penggunaan energi rendah karbon di Indonesia. Hal ini menunjukkan penguatan pada penggunaan sumber energi rendah karbon

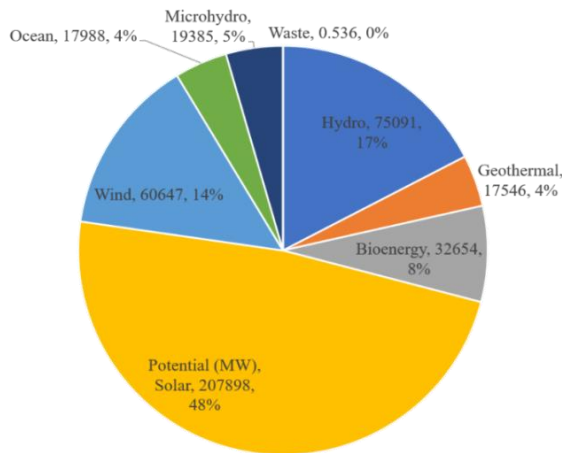
yang berbasis pada sumber daya energi baru dan terbarukan (EBT). Kontribusi EBT akan dominan secara bertahap dan pada saat yang sama penggunaan energi fosil akan berkurang sebelum tahun 2060 secara bertahap (Permana et al., 2022; Setiawan, 2021). Bauran energi nasional dalam program NZE Indonesia di tahun 2060 memperlihatkan mayoritas energi primer oleh EBT, yaitu di atas 60% sementara porsi energi fosil sebesar di bawah 40%. Sementara di program NZE global, bisa kita bandingkan bahwa NZE global di tahun 2050 masih didominasi energi fosil lebih dari 50% dan sisanya sekitar 44% EBT seperti tampak pada **Gambar 14**.



**Gambar 14** Proyeksi Bauran Energi Program NZE Global dan Indonesia

Sebagai kebijakan pemerintah, program NZE 2060 mengacu pada kebijakan energi sebelumnya yang saat ini mempunyai paradigma yang telah berubah untuk melihat entitas energi dari paradigma energi sebagai cadangan devisa menjadi energi dapat dianggap sebagai modal untuk membangun kepentingan nasional negara. Energi menjadi pemain penting dalam membangun bangsa atau sebagai subjek dan menjadi infrastruktur penting dalam pembangunan. Hal tersebut mengacu pada peraturan Undang-Undang Nomor 3 Tahun 2007 tentang Energi, dan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2017 tentang Perencanaan Energi Nasional (Pemerintah Indonesia, 2017) yang berkaitan dengan aturan Rencana Umum Energi Nasional dan Peraturan Pemerintah No. 74 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional (Pemerintah Indonesia, 2014). Adanya kebijakan pemerintah yang berubah tersebut menjadi bahwa energi dapat dilihat sebagai dasar fundamental kekuatan nasional dalam bidang kegiatan ekonomi domestik untuk meningkatkan pendapatan negara, dapat

menjadikan Indonesia mandiri energi dan melanjutkan ke fase industri dan merangkak menjadi negara maju di masa yang akan datang. Oleh karena itu, pengelolaan sumber daya energi nasional menuju pembangunan berkelanjutan menjadi tugas penting dan pusat gravitasi bagi pertumbuhan ekonomi dan konektivitas bagi pembangunan di tanah air.

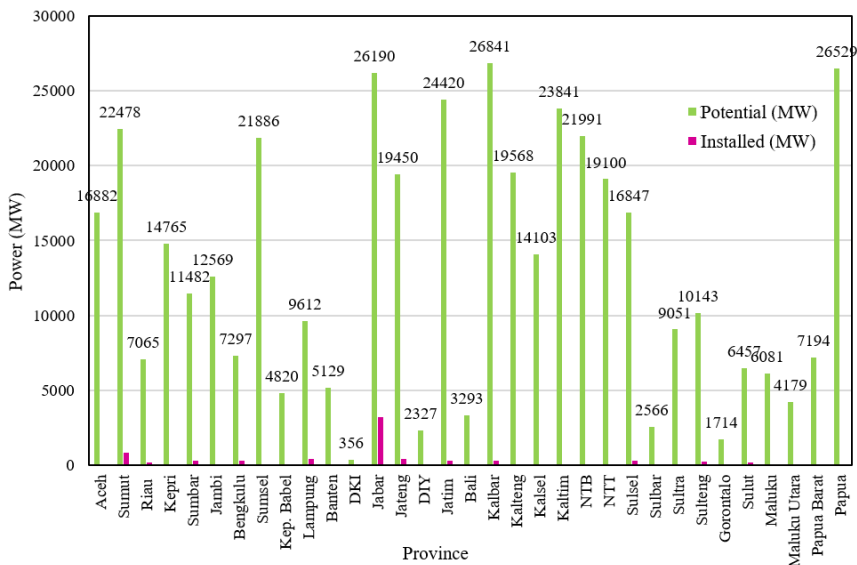


**Gambar 15** Potensi Sumber Daya Energi Baru Terbarukan Indonesia Yang Berbeda Beda (Permana et al., 2021, 2022)

## 1.5 Program Energi Baru dan Terbarukan di Indonesia

Sebagaimana sebelumnya dijelaskan, bahwa kebijakan energi nasional akan seiring dengan Keputusan Presiden Republik Indonesia No. 22 Tahun 2017, Peraturan Pemerintah No. 74 Tahun 2014 (Kebijakan Energi Nasional/KEN) dan Undang-Undang No. 3 Tahun 2007 tentang energi secara umum, memperkuat komitmen pemerintah untuk kebijakan energi nasional jangka panjang terutama dan menekankan pada kontribusi energi baru dan terbarukan (EBT) dalam bauran energi nasional (Pemerintah Indonesia, 2014, 2017). Indonesia secara sumber daya alam dan penduduk yang besar menjadikan negara kita sebagai negara besar. Dengan memiliki kepulauan yang banyak tersebar dan kekuatan sumber daya alam yang banyak, sudah seharusnya dikelola dengan baik agar menjadikan masyarakat Indonesia adil dan makmur dan sejahtera secara merata. Akan tetapi apabila dieksploitasi terus menerus bahan sumber daya alam akan berkurang dan terbatas seperti bahan bakar fosil baik minyak dan gas serta batu bara. Sehingga diperlukan pencarian sumber daya alam lainnya di tengah keterbatasan bahan bakunya.

Di sisi lain, Indonesia juga memiliki sumber daya lama yang melimpah, yaitu berupa potensi energi baru dan terbarukan, yaitu tenaga air, panas bumi, surya, energi laut, angin, mikrohidro, dan biomassa/limbah, dengan rincian potensi sumber daya dari PLTA sekitar 75 GW, kemudian potensi sumber daya panas bumi sekitar 17,5 GW, kemudian potensi bioenergi 33 GW, potensi energi surya 208 GW, potensi energi angin 61 GW, dan potensi energi laut 18 GW yang ditunjukkan pada **Gambar 15** untuk berbagai sumber energi dengan total sumber daya energi tersebut sekitar 432 GW (Dewan Energi Nasional, 2019).



**Gambar 16** Potensi Distribusi Energi Baru Terbarukan Indonesia di Tiap Provinsi (Permana et al., 2021)

Potensi sumber daya energi tersebut sebagai potensi energi baru dan terbarukan yang beragam dan tersebar di setiap provinsi di Indonesia seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16. Semua ini adalah potensi yang perlu dioptimalkan dan digunakan secara bijaksana dan efektif. Potensi ini merupakan perkiraan dari kekayaan alam yang kita punyai selama ini, akan tetapi dalam pemanfaatannya dari potensi menjadi sumber daya yang layak dimanfaatkan sampai pada hilirisasi tentunya akan berkurang signifikan, bisa jadi hanya bisa dimanfaatkan 30% dari potensi atau 50% sampai 80% atau bahkan lebih kecil hanya 10% yang bisa dimanfaatkan. Demikian pula dari potensi listrik yang terpasang, maka akan dipengaruhi teknologi pembangkit dan fluktuasi sumber energinya baik terkait stabilitas sumber bahan bakar atau keamanan suplainya ke pembangkit maupun sifat intermitensi

pembangkit khususnya energi terbarukan. Hal ini perlu menjadi perhatian khusus dalam sistem jaringan dengan beban dan kondisi yang berbeda-beda baik dalam strategis based load atau beban utama maupun load following atau hybrid sistem. Infrastruktur dan jaringan tiap daerah pun berbeda-beda dengan ketersediaan sumber energi yang berbeda pula. Diperlukan kajian komprehensif dan menyeluruh sehingga potensinya bisa optimal dimanfaatkan dan ada sinergi dengan bauran energi yang digunakan.

Dalam beberapa tahun kebelakang Indonesia memiliki tambahan kapasitas listrik terutama dalam kurun lima tahun terakhir ini sekitar hampir 15 GWe, sehingga dari penambahan tersebut dapat berkontribusi terhadap peningkatan kapasitas terpasang nasional dari kapasitas terpasang 54,7 GWe menjadi 69,9 GWe pada tahun 2020 (KESDM, 2020). Berdasarkan data yang ada, dominasi bahan bakar fosil masih utama dan berperan sebagai penyumbang energi terbesar di antaranya bersumber dari pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) batu bara dengan kapasitas terpasang sekitar 34,7 GWe atau 49,9% komposisi, kemudian pembangkit bahan gas (PLTG), dengan kapasitas sekitar 19,9 GWe atau berkontribusi sekitar 28,6%, dan pembangkit listrik tenaga surya atau matahari (PLTS) dengan kapasitas terpasang sekitar 4,6 GWe atau setara komposisi 6,7%. Mengacu pada pemanfaatan energi baru terbarukan (EBT), Indonesia telah membangun pembangkit EBT dengan kontribusi sekitar sekitar 10,3 GW atau setara 14,8% komposisi dari total kapasitas terpasang nasional (Rully R. Ramli & Bambang P. Jatmiko, 2020). Pembangkit EBT ini berasal dari pembangkit listrik tenaga air (PLTA) sekitar 6 GWe kapasitas terpasang dan pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) sekitar 2 GWe kapasitas terpasang dan sisanya berasal dari sumber EBT lainnya. Kebutuhan energi Indonesia terus meningkat seiring waktu menjadi 73 GWe di tahun 2021, dengan masih di dominasi oleh bahan bakar fosil (Indrawan, 2021). Kontribusi EBT sekitar 9% (6,3 GWe) dari PLTA, PLTP menyumbang 2,2 GWe, lainnya EBT menyumbang 2,2 GWe. Dari data tahun 2020 ke tahun 2021, kontribusi pemanfaatan EBT mengalami kenaikan kapasitas terpasang nasional dari 10,3 GWe menjadi 10,7 GWe, atau sekitar 0,4 GWe kenaikan dalam satu tahun periode 2020-2021. Hal ini perlu dievaluasi bahwa laju konstirbusi EBT masih kecil, dan perlu ditingkatkan dalam rangka pemanfaatan energi rendah emisi karbon.

Energi nuklir sebagai energi baru di Indonesia telah ditemukan beberapa sumber daya mineral sebagai sumber daya nuklir, seperti uranium dan

thorium. Selain ditemukan di Kepulauan Bangka-Belitung, uranium dan thorium juga ditemukan di Kabupaten Bengkayang, Kalimantan Barat, di daerah Seruyan dan Lamandau, Kalimantan Tengah, dan Kabupaten Mamuju, Sulawesi Barat (Badan Geologi, 2019). Adapun sumber daya uranium ditemukan sekitar 75.833 tU-79.830 dalam semua kategori, dan kegiatan eksplorasinya masih berlanjut di Indonesia pada daerah-daerah potensial, sedangkan sekitar 137.000-170.000 ton cadangan throrium banyak ditemukan di Bangka Belitung dan sisanya di Barat. Kalimantan dan Sulawesi yang ditunjukkan pada Gambar 17 diperkirakan lebih melimpah potensinya di Indonesia (Kai Putri et al., 2022; Syaeful et al., 2021; Wikipedia, 2022).

Sebagai bagian dari energi baru dan terbarukan (EBT), pemanfaatan energi nuklir akan berkontribusi dalam bauran energi nasional pada tahun 2040 secara akumulatif dan akan terus bertambah, sehingga peta jalan implementasinya harus dibuatkan seger dan untuk program jangka panjang yang berkelanjutan (Permana et al., 2022). Pembangkit listrik tenaga nuklir sebagai bagian dari sektor pembangkit listrik memberikan beberapa peluang dan kontribusi yang bermanfaat bagi bauran energi nasional termasuk sektor energi maupun non-energi, berdasarkan pengalaman negara-negara yang memiliki Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) lebih dari 440 unit yang beroperasi saat ini di 32 negara baik di negara berkembang maupun di negara maju.



Gambar 17 Sumber daya energi nuklir dan potensi di Indonesia (Kai Putri et al., 2022)

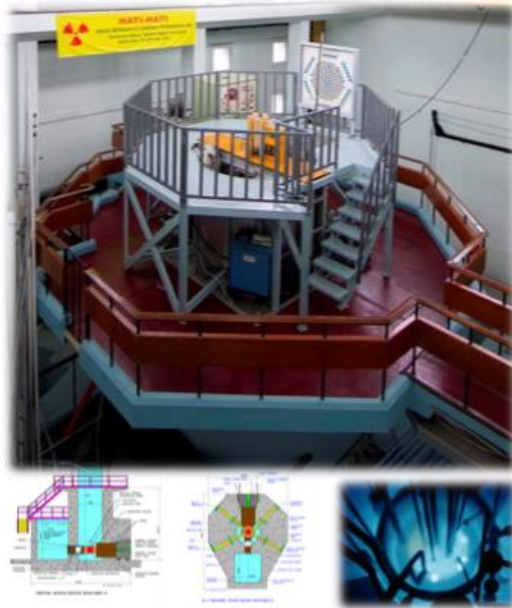


## 1.6 Program Energi Nuklir di Indonesia

Saat itu, Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) pertama di dunia di Obninsk Rusia mulai beroperasi pada tahun 1954 (Permana et al., 2021). Badan nuklir nasional (Lembaga Tenaga Atom atau LTA) didirikan pada tahun 1958 dan diubah namanya menjadi Badan Tenaga Nuklir Nasional (NNEA/BATAN) pada tahun 1964. Semenjak didirikan komite nasional radioaktifitas dan kemudian LTA, kontribusi universitas atau akademi dalam hal ini ITB pengajar dan mahasiswanya semenjak kegiatan perintisan pemanfaatan ilmu dan rekayasa nuklir telah dilakukan, dan kerja sama LTA dan ITB berlanjut dengan pembangunan Reaktor Bandung yang peletakan batu pertama dilakukan Presiden Sukarno tahun 1961 dan mencapai kondisi kritis operasional reaktor di tahun 1964 (Wikipedia, 2016). Indonesia mengumumkan niatnya untuk mempromosikan program PLTN pada tahun 1968 dan untuk melaksanakan program PLTN di Indonesia, beberapa studi untuk memperkenalkan PLTN telah dilakukan dan membentuk panitia kesiapan kemampuan Indonesia untuk membangun PLTN tahun 1972, sebuah komisi persiapan pembangunan PLTN. Dalam rangka penyiapan pemanfaatan energi nuklir dan PLTN di Indonesia, telah dimulai dengan dibangunnya reaktor riset pertama dan mulai beroperasi pada tahun 1965 di Bandung Jawa Barat yang diresmikan oleh presiden pertama RI, Soekarno, dengan nama Reaktor Bandung (Permana, 2012; Wikipedia, 2016) seperti tampak dalam **Gambar 18**.

Untuk meningkatkan kemampuan pengoperasian reaktor nuklir dan pemanfaatan energi nuklir yang lebih banyak terutama untuk pengembangan sumber daya manusia, Indonesia membangun reaktor riset kedua yang berlokasi di Yogyakarta pada tahun 1979, bersamaan dengan terjadinya kecelakaan Three Mile Island (TMI) di Amerika Serikat. Reaktor Yogya dirancang dan dibangun oleh para ilmuwan dan insinyur Indonesia dengan bantuan pengawasan General Atomic (GA) serta beberapa pengalaman dari reaktor riset pertama. Pada tahun 1980-an, Indonesia memiliki niat untuk membangun PLTN pertama yang hampir bersamaan dengan Korea untuk Industri Nuklir dimulai (Amir, 2010; Permana, 2012) pada tahun 1980-an, tetapi ditunda. Penerapan energi nuklir dalam penerapan non-listrik sudah diterapkan untuk keperluan pertanian, kedokteran, rumah sakit, dan sebagainya. Namun untuk produksi listrik sebagai pembangkit listrik,

Indonesia masih harus menunggu lebih dari 50 tahun sejak implementasi pertama PLTN pada tahun 1970-an.



Sumber: Jupiter Sitorus Pane, Experiences On Operation and Utilization of TRIGA 2000, ORTN - Badan Riset dan Inovasi Nasional, 2021

**Gambar 18** Reaktor TRIGA 2000 BRIN di Bandung

Indonesia memiliki sumber daya bahan bakar nuklir (Uranium dan Thorium) di wilayah tertentu dari Sumatra hingga Papua. Thorium telah ditemukan sebagai unsur yang bersenyawa dengan logam tanah jarang berupa mineral monasit yang dapat memancarkan partikel radioaktif sinar alfa ( $\alpha$ ). Bentuk lain dari sumber daya thorium adalah xenotime dan zirkon. Sumber daya thorium dengan logam tanah jarang banyak ditemukan di Kepulauan Bangka-Belitung dan Riau. Selain bahan bakar thorium, Indonesia juga telah menemukan bahan nuklir lainnya, yaitu uranium. Uranium dapat ditemukan di banyak daerah antara lain Kepulauan Bangka-Belitung serta di Kabupaten Bengkayang, Kalimantan Barat, di daerah Seruyan dan Lamandau, Kalimantan Tengah, dan Kabupaten Mamuju, Sulawesi Barat (Badan Geologi, 2019; Permana et al., 2021).

Berkaitan dengan Kebijakan Energi Nasional (KEN) yang dirilis pada tahun 2014, yang memberikan lima butir kebijakan sebagai mandat bagi pemerintah dalam arah prioritas pembangunan energi nasional, disebutkan

pula bahwa energi nuklir dapat menjadi bagian dari solusi sebagai solusi terakhir resor pada waktu itu. Sebagai salah satu penyumbang energi dunia, energi nuklir menjadi salah satu sumber energi yang memberikan solusi hijau bagi kebutuhan energi yang ramah lingkungan dan sebagai sumber energi yang berkelanjutan (EnCore Energy Corp, 2022; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015; Markandya & Wilkinson, 2007; Ritchie & Roser, 2020b; US DOE, 2021a; World Nuclear Association, 2011). Sebagai sumber energi rendah emisi karbon, energi nuklir bersama dengan energi tenaga air sebagai penyumbang utama sumber energi rendah karbon serta sumber energi baru dan terbarukan lainnya membawa produksi energi menjadi lebih ramah lingkungan yang membawa dampak ekonomi yang signifikan terutama karena pembangkit listrik berbasis nuklir memiliki umur operasi yang lebih lama untuk penyumbang energi bersih. Baru-baru ini dalam berbagai acara, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), Dewan Energi Nasional Indonesia (DEN) dan Perusahaan Listrik Nasional Indonesia telah membahas dan membuat kemajuan dalam penyusunan peta jalan berdasarkan program *Net Zero Emission* atau emisi nol bersih di 2060 dan mempresentasikan kepada publik tentang program mereka dan perkiraan mereka untuk program emisi nol bersih.

Sebagaimana telah disebutkan, *roadmap program zero net CO2 emission* pada tahun 2060, yang menunjukkan kebijakan tersebut akan memperkuat kebijakan energi rendah CO2 sumber daya energi baru dan terbarukan (EBT) dan menjadikan kontribusi EBT sebagai penyumbang energi utama. Kebijakan EBT yang lebih kuat juga akan berdampak pada adopsi energi nuklir sebagai bagian dari energi baru dan terbarukan ke dalam bauran energi nasional pada tahun 2040, sementara kontribusi energi fosil akan semakin berkurang dan sebagian akan dihapus sebelum tahun 2060 (Permana et al., 2022; Setiawan, 2021; Umah, 2021). Ketika kontribusi energi nuklir atau PLTN sekitar tahun 2040-an masuk pada jaringan kelistrikan nasional dengan total kapasitas adalah akumulasi energi 8-10 GWe, dengan demikian apabila dalam 1-2 tahun mulai beroperasi 1-2 GWe, artinya PLTN pertama diharapkan sekitar tahun 2030-2033 sudah mulai beroperasi dan demikian setiap 1-2 tahun berturut-turut PLT 1-2 GWe beroperasi. Apabila PLTN beroperasi dan memasuki jaringan di rentang tahun 2030-2033, hal ini berarti membutuhkan waktu lebih awal untuk waktu konstruksi awal, proses *comisioning*, proses perizinan, studi kelayakan, persetujuan lokasi dan beberapa persetujuan

pemerintah untuk proyek tersebut. Dan akan jauh lebih awal ketika kontribusi PLTN membutuhkan lebih cepat ketika kontribusi EBT lain menunjukkan kontribusi lambat. Semua proses implementasi PLTN tersebut harus dikerjakan dengan waktu yang ketat dan paralel. Tipe dan daya reaktor yang dibangun bisa bervariasi, baik skala besar, menengah atau kecil yang sering disebut *small modular reactor* (SMR). Apabila skala daya besar cukup satu unit, tetapi kalau SMR bisa di bangun multi-unit PLTN yang berdekatan lokasi atau sesuai dengan beban listrik di daerah.

## 1.7 Pemanfaatan Energi Nuklir Dunia

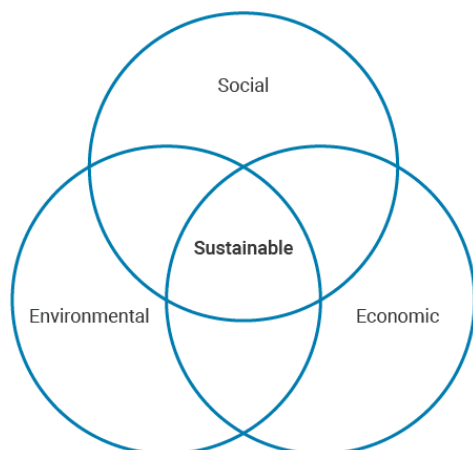
Dalam pemanfaatan energi secara global, PLTN telah memberikan beberapa peluang dan kontribusi yang bermanfaat bagi bauran energi nasional termasuk sektor energi maupun sektor non-energi. Sejak pembangkit listrik tenaga nuklir komersial pertama mulai beroperasi pada tahun 1950-an di Rusia, energi nuklir telah menyumbang listrik dunia sekitar 10% dari lebih dari 440 unit pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) yang juga memberikan kontribusi terbesar kedua di dunia untuk energi rendah karbon, atau setara dengan 28% dari total kontribusi energi rendah karbon pada tahun 2019. Selain itu, pemanfaatan energi nuklir tidak hanya untuk pembangkit listrik atau non-listrik, tetapi juga berkontribusi bagi lebih dari 50 negara yang memanfaatkan energi nuklir sekitar 220 reaktor riset untuk tujuan penelitian dan pengembangan ilmu dan pengetahuan kenukliran di antaranya kegiatan dan pelatihan serta untuk produksi isotop medis dan industri.

Energi nuklir untuk tujuan sipil saat ini berpengalaman beroperasi lebih dari 18.000 tahun reaktor, yang telah digunakan di 32 negara berkembang dan negara maju dengan kontribusinya sekitar 2553 TWh atau setara dengan 10 % produksi listrik dunia (26.730 TWh). Penggunaan tenaga listrik dari PLTN yang terbesar adalah Amerika Serikat (USA), yaitu sebesar 790 TWh dan disusul Cina 345 TWh, Perancis 349 TWh dan seterusnya, serta baru-baru ini PLTN yang baru muncul adalah United Arab Emirates (UEA) dengan target 4 unit PLTN beroperasi dan berkontribusi 25% listrik di UEA (World Nuclear Association, 2022b). Secara Regional di Eropa, melalui jaringan transmisi regionalnya, lebih banyak negara bergantung sebagian pada energi nuklir di antaranya Italia dan Denmark, misalnya, mendapatkan hampir 10% listriknya dari impor Energi Nuklir. Negara-negara di Eropa menganggap PLTN sebagai

program energi mereka karena Nuklir sebagai salah satu sumber energi yang bersih, aman, dan berumur panjang. Indonesia sebagai negara besar dan negara kepulauan serta sebagai negara dengan populasi terbesar ke-4 di dunia, negara ini akan terus berkembang, ekonomi akan terus meningkat, pertumbuhan penduduk, industri dan aspek lainnya akan terus mengalami kenaikan. Pertumbuhan ekonomi tersebut tentunya membutuhkan sumber energi yang cukup untuk mendukung pembangunan nasional dan saat bersamaan dapat menggunakan sumber energi yang ramah lingkungan.

## 1.8 Energi untuk Pembangunan Berkelanjutan (SDG)

Suatu konsep pembangunan berkelanjutan didasarkan pada pendekatan integratif dan holistik yang membawa hubungan antara negara dan generasi, dan pada saat yang sama konsep pemerataan dan pandangan keseimbangan faktor lingkungan, sosial, dan ekonomi harus dipenuhi. Pada tahap ini, konsep keberlanjutan telah didedikasikan tidak hanya dalam perspektif keseimbangan atau keseimbangan pasokan dan permintaan energi, tetapi juga dalam konteks perubahan iklim serta dalam hal faktor degradasi lingkungan dan aspek ekonomi akan dimasukkan dengan situasi yang lebih kompleks. Seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 19**, keberlanjutan atau sustainabilitas energi harus mencakup dan selaras dengan aspek sosial, lingkungan, dan ekonomi. Oleh karena itu, konsep berkelanjutan yang memiliki tiga pilar ini akan membawa gambaran besar terutama untuk aspek energi sebagai aspek yang sangat penting dan penuh tantangan untuk saat ini dan beberapa dekade ke depan atau bisa sampai akhir abad ini dan seterusnya. Bagaimana menerapkan konsep keberlanjutan ini sementara saat ini lebih dari 80% energi berasal dari energi fosil seperti minyak, gas dan batubara dari tahun 1990 dan akan masih stabil untuk dekade ke depan. Bahan bakar fosil tersebut berkontribusi terhadap perubahan iklim, kerusakan lingkungan dan beberapa aspek kesehatan lainnya ke rakyat. Manusia membutuhkan energi untuk kehidupan yang lebih baik dan kesejahteraan ekonomi, tetapi bagaimana mengelola pemanfaatan energi yang dapat membawa energi hijau yang ramah lingkungan dan dapat diterima secara sosial serta dapat diterima secara ekonomi.



**Gambar 19** Tiga 'Pilar' Keberlanjutan (Sustainabilitas) (World Nuclear Association, 2022a)



**Gambar 20** Tujuan pembangunan berkelanjutan (SDG) PBB (World Nuclear Association, 2022a)

Sekitar 193 negara anggota Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) telah mengadopsi Agenda 2030 untuk Pembangunan Berkelanjutan pada tahun 2015 (Asosiasi Nuklir Dunia, 2022b) dan mereka menyetujui PBB menyetujui 17 Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) untuk digunakan setiap aktivitas negara anggota sebagai pedoman dan sejalan dengan konsep keberlanjutan. Ada 17 agenda yang membutuhkan sinergi lintas negara yang dapat mencakup semua agenda secara efektif dan memberikan beberapa kemajuan seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 20**. Beberapa SDGs tersebut memiliki korelasi dengan keberlanjutan energi secara langsung maupun dalam mendukung kegiatan dan aspek.

Ketika energi menjadi berkelanjutan, itu akan membawa tujuan pembangunan berkelanjutan dunia menjadi berkelanjutan. Sebagaimana disebutkan bahwa peningkatan kebutuhan energi harus diimbangi dengan peningkatan pasokan energi dari berbagai sumber energi, tetapi untuk membawa kondisi lingkungan yang lebih baik, energi tersebut harus menghasilkan emisi yang lebih rendah selama aktivitas siklus hidupnya. Dalam hal energi, memiliki tujuan dalam SDGs di SDG 7 yang menyebutkan tentang energi yang terjangkau dan bersih. SDG7 ini diakui secara luas sebagai ketentuan pasokan energi yang berkelanjutan. Bagaimana energi dapat menyediakan akses energi yang terjangkau, andal, dan bersih bagi masyarakat. Konsep SDG7 ini harus secara efektif mengurangi kemiskinan, meningkatkan kesehatan dan pendidikan masyarakat serta mengurangi gas rumah kaca di seluruh siklus hidup energi (World Nuclear Association, 2022a).

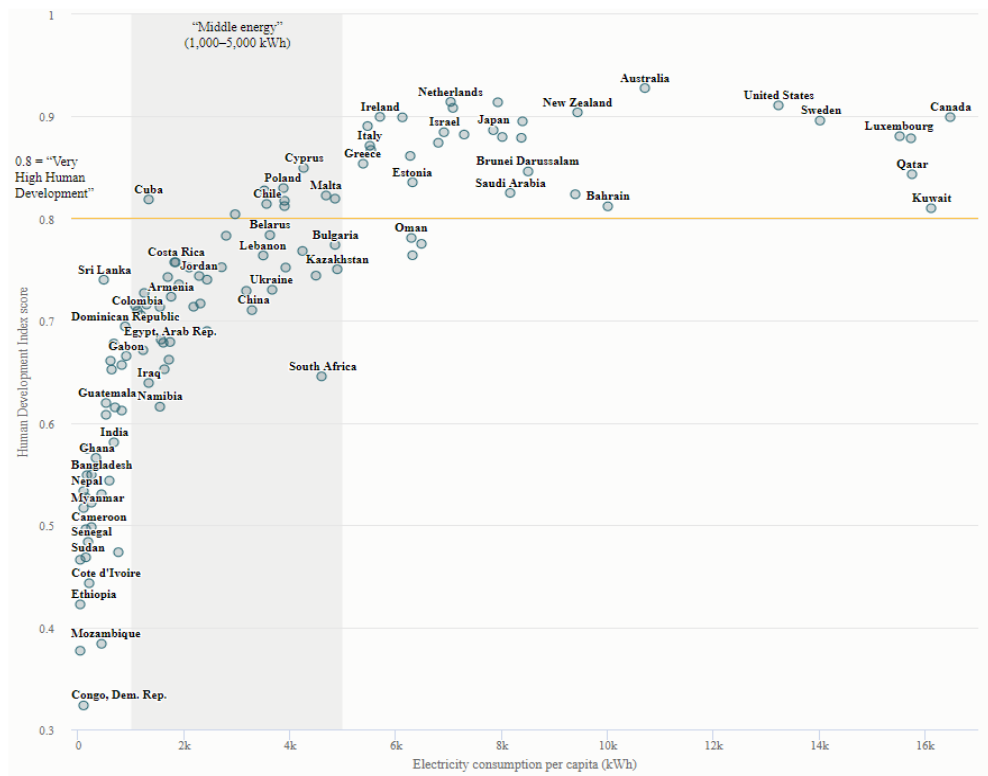


**Gambar 21** Index Pembangunan Manusia (IPM/HDI) dan Konsumsi Energi Per-capita Tahunan, 2020 (World Nuclear Association, 2022a)

## 1.9 Index Pembangunan Manusia (IPM/HDI) dan Konsumsi Energi

Konsumsi energi dalam suatu populasi maupun dalam suatu negara akan memiliki korelasi dengan indeks pembangunan manusia (IPM/HDI). Seperti terlihat pada **Gambar 21** yang menunjukkan beberapa negara terpilih memiliki konsumsi energi dalam Gigajoule perkapita dan berkorelasi dengan

IPM masing-masing negara. Ini menunjukkan sekitar 80% populasi dunia memiliki 100 GJ per kapita dan lebih rendah yang menunjukkan hubungan antara populasi dan konsumsi energi untuk negara berkembang. Situasi ini dapat diperkirakan yang memiliki korelasi yang jelas antara konsumsi energi mereka dan nilai Indeks Pembangunan Manusia (IPM/HDI). Nilai IPM/HDI ini dapat dilihat sebagai indikator kesehatan, pendidikan dan taraf hidup suatu bangsa dan dalam hal ini keadaan 80% penduduk dunia untuk negara berkembang atau lebih rendah.



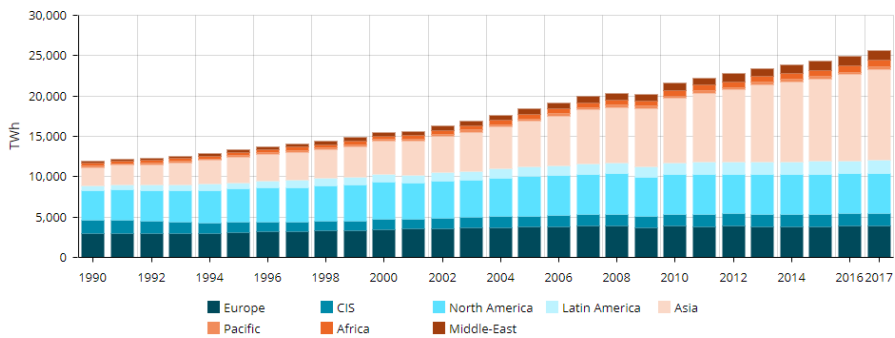
**Sumber:** UNECE, 2021, Application of the United Nations Framework Classification for Resources and the United Nations Resource Management System: Use of Nuclear Fuel Resources for Sustainable Development – Entry Pathways, A report prepared by the Expert Group on Resource Management Nuclear Fuel Resources Working Group, Geneva, 2021

**Gambar 22** Index Pembangunan Manusia (IPM/HDI) dan Konsumsi listrik [kWh] Per-capita Tahunan, 2021 (Sumber: (UNECE, 2021))

Dan baru sekitar 20% penduduk dunia yang mempunyai nilai HDI di atas 0,8 dengan konsumsi energi per kapita yang lebih dari 100 GJ. Ketimpangan ini tentunya harus dikurangi sehingga terjadi pemerataan. Dari data tersebut dapat memperlihatkan bahwa pembangunan manusia sebuah negara akan

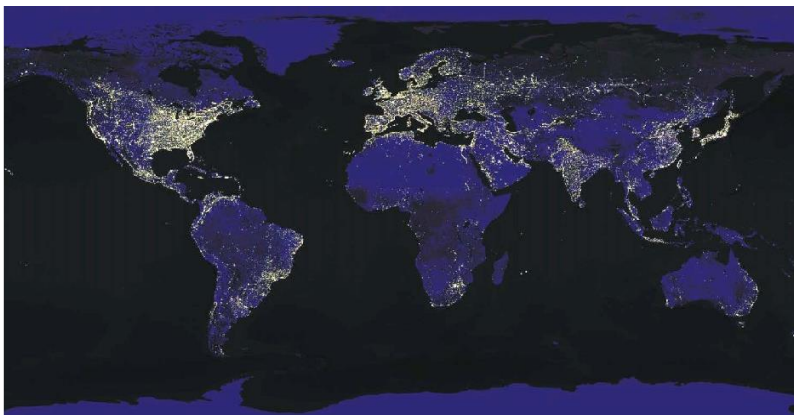


senantiasa berkorelasi dengan pertumbuhan konsumsi energi atau pertumbuhan produksi energi di negaranya. Karena itu infrastruktur energi menjadi sangat penting dan berkaitan erat untuk peningkatan mutu pembangunan manusia dan seiring dengan itu menandakan tingkat kesejahteraan penduduk suatu negeri. Akses terhadap listrik khususnya berkaitan erat dengan pembangunan manusia, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 22**. Peningkatan kualitas hidup akan sangat terbatas jika tidak ada perubahan besar dalam hal ini konsumsi. Di tahun 2021, diperkirakan sekitar 790 juta orang tidak memiliki akses terhadap listrik; sementara lebih dari satu miliar lainnya hanya memiliki akses yang tidak pasti dan suplai listrik yang terputus-putus atau kondisi intermitansi.



Gambar 23 Konsumsi listrik [kWh] Per-capita tiap kawasan di dunia, 2021 (UNECE, 2021)

### World Electricity Mapping



[http://www.marctomarket.com/2012\\_04\\_01\\_archive.html](http://www.marctomarket.com/2012_04_01_archive.html)

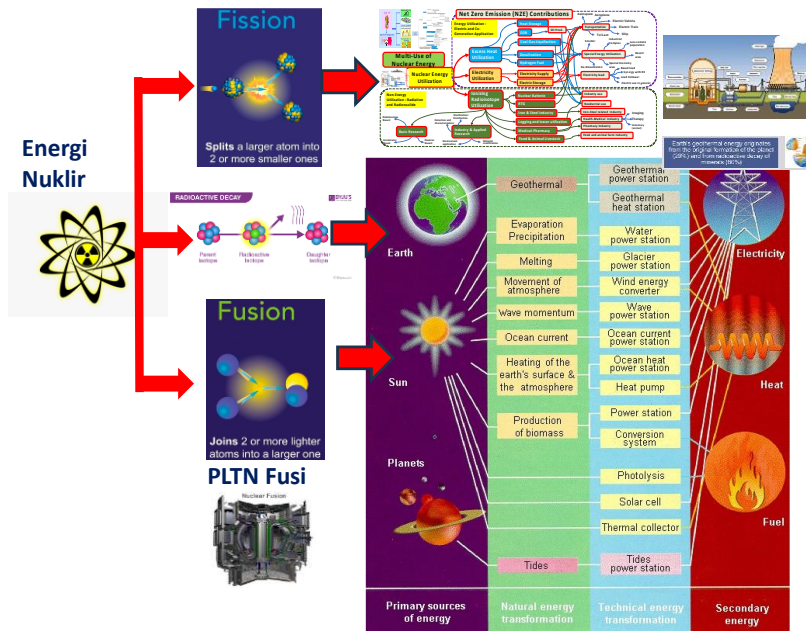
**Sumber:** Deendarlianto, National Prosperity due to Nuclear Technology and Collaboration with University, Workshop kesiapan Indonesia dalam Pemanfaatan Energy Nuklir, Jakarta 20-21 Oktober, 2015

**Gambar 23** Peta Kelistrikan Dunia (Deendarlianto, 2015)

Seperti di gambarkan pada **Gambar 23**, disebutkan bahwa sekitar tiga dekade terakhir, peningkatan produksi listrik paling besar terjadi di Asia. Sementara kawasan lainnya mengalami kenaikan sedikit dan hampir konstan terutama di kawasan Eropa yang mengalami kenaikan kecil. Kenaikan signifikan di Asia terjadi karena kontribusi dua negara besar di Asia, yaitu Cina dan India, kemudian ke depan disusul dengan Indonesia. Seiring dengan kenaikan konsumsi energi, diperkirakan perekonomian Tiongkok telah mengalami pertumbuhan eksponensial selama ini beberapa dekade terakhir dan di tahun 2021 kemampuan ekonomi Cina sekitar \$12 triliun (USD), yang tentunya menjadikannya sebagai negara dengan perekonomian terbesar kedua di dunia. Dengan demikian dalam rangka mendukung pertumbuhan perekonomiannya yang besar, Cina akan tetap menjadi produsen energi terbesar di dunia konsumen dan diperkirakan konsumsinya dapat mencapai 22 persen konsumsi energi dunia pada tahun 2040 (UNECE, 2021). Apabila kita mengaca pada peta dunia pada **Gambar 24**, terlihat bahwa konsumsi listrik diperlihatkan oleh terangnya sebuah kawasan atau negeri dan di negeri atau kawasan yang lain masih terlihat gelap gulita atau sebaran listrik yang sedikit-sedikit cahayanya. Konsumsi listrik memperlihatkan kemakmuran sebuah negeri dan sampai saat ini masih terjadi ketimpangan di dunia ini.

## 2. IPTEK NUKLIR DAN APLIKASI

### 2.1 Prinsip Dasar Pemanfaatan Reaksi Nuklir



Sumber: <https://www.energy.gov/ne/articles/fission-and-fusion-what-difference>, General scheme of renewable energies and related conversion processes (Source: Fachhochschule Aachen, Germany); <http://nesa1.uni-siegen.de/wwwextern/idea/keytopic/2.htm>, <https://www.energy.gov/ne/articles/fission-and-fusion-what-difference>, <https://www.fornuclear.org/en/updates/in-depth/what-are-the-different-components-of-a-nuclear-power-plant/>; <https://byjus.com/physics/radioactive-decay/>

**Gambar 24** Prinsip pemanfaatan energi dari reaksi nuklir

Reaksi nuklir secara prinsip adalah sebuah peristiwa yang terjadi di seluruh alam semesta yang berkaitan dengan inti atom. Inti atom adalah inti penyusun atom yang menjadi dasar pembentukan materi di alam semesta dari orde ukuran inti atom sampai pada alam semesta yang sangat luas. Secara umum reaksi inti atom atau reaksi nuklir terdiri atas reaksi fisi atau reaksi pembelahan nuklir dan reaksi fusi atau reaksi penggabungan inti atom. Reaksi ketiga adalah reaksi peluruhan inti atom yang secara prinsip semua inti atom yang bersifat radioaktif atau tidak stabil akan mengalami peluruhan inti dan berubah menjadi inti atom yang lain sampai menuju inti yang stabil. Bahan radioaktif atau inti atom yang tidak stabil ada di sekeliling kita dan memancarkan partikel radioaktif berupa alfa, beta dan gamma, juga beberapa kasus dapat memancarkan neutron terutama di fasilitas nuklir. Sebagaimana digambarkan pada **Gambar 25**, ketiga prinsip reaksi nuklir melatar belakangi

beberapa aplikasi yang sudah dimanfaatkan dalam penggunaan energi di dunia. Secara umum energi nuklir dikenal sebagai energi nuklir fisi karena diperoleh dari reaksi pembelahan atau reaksi fisi dan salah satu aplikasinya adalah untuk PLTN. Reaksi peluruhan inti atom juga terjadi di dalam inti bumi kita yang berkontribusi pada pembentukan magma di inti bumi yang sangat panas yang berlangsung sangat lama sampai ribuan derajat celcius. Sekitar 80% kontribusi peluruhan bahan radioaktif menghasilkan energi panas di dalam inti bumi berupa energi geothermal. Sehingga diaplikasikan untuk pembangkit listrik tenaga panas bumi atau PLTB, selain itu digunakan untuk pemandian air hangat dan penghangat untuk masyarakat. Reaksi yang ketiga adalah reaksi fusi nuklir yang secara alami terjadi di matahari kita akibat reaksi inti ringan nuklir yang saling bergabung dalam suhu yang sangat panas jutaan derajat celcius. Reaktor fusi ini terjadi di matahari dan memancarkan radiasi elektromagnetik dan panas. Radiasi tersebut sampai kebumi dan mempengaruhi keadaan bumi dari penguapan, pengendapan, yang kemudian dimanfaatkan untuk pembangkit tenaga air. Fenomena lain adalah mempengaruhi pergerakan atmosfer yang dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik angin, kemudiann mempengaruhi keadaan lautan dan gelombang laut sehingga dapat dimanfaatkan untuk tenaga gelombang atau perbedaan panas dilaut. Sinar matahari juga mempengaruhi tanaman di bumi untuk memproduksi biomassa dan dimanfaatkan untuk pembangkit biomasa. Selain itu sinar matahari dan panas bisa dimanfaatkan untuk pembangkit solar thermal dan juga solar PV yang tentunya dapat dimanfaatkan untuk pembangkit tenaga surya. Jadi secara prinsip reaksi nuklir mempengaruhi kehidupan sehari-hari ini terutama untuk aktivitas pembangkit listrik pada energi baru dan terbarukan.

## History of Nuclear Science and Engineering

1808	Dalton	: Atomism
1876	Goldstein	: cathode-rays
1891	Stoney	: hypothesis of electrons
1895	Roentgen	: X-rays
1896	Becquerel	: radioactivity
1897	Thomson	: cathode-rays = electrons
1898	Rutherford	: $\alpha$ , $\beta$ -rays
1905	Einstein	: special theory of relativity
1911	Rutherford	: atomic model
1912	Thomson	: separation of isotope
1919	Aston	: mass spectrograph
1921	Masson, Harkins	: hypothesis of neutrons
1930	Bothe	: Be( $\alpha$ , ?)
1932	M. & J. Curie	: Be( $\alpha$ , $\gamma$ )
	Chadwick	: <b>discovery of neutron</b>
1934	Fermi	: slow neutrons
	Szilard	: idea of chain reactions
1939	Hahn, Strassman, Meitner	: <b>discovery of fission</b>
1942	Fermi	: <b>CP-1 critical</b>
1944	Pu-production reactor	critical (Hanford, USA)
1945	1 <sup>st</sup> atomic bomb	exploded (USA)
1945	natural uranium & heavy water cooled reactor (ZEEP)	critical (Canada)
1946	fast reactor (Clementine)	critical (USA)
1950	swimming-pool reactor (BSR)	critical (USA)
1951	fast reactor (EBR-1)	critical & produce electricity (USA)
1953	hydrogen bomb	exploded (USSR)
	atoms-for-peace initiative	(UN, USA)
1954	nuclear submarine Nautilus	launched (USA)

Sumber : H. Sekimoto, 2002, Catatan Kuliah Nuclear Engineering, Tokyo Institute of Technology

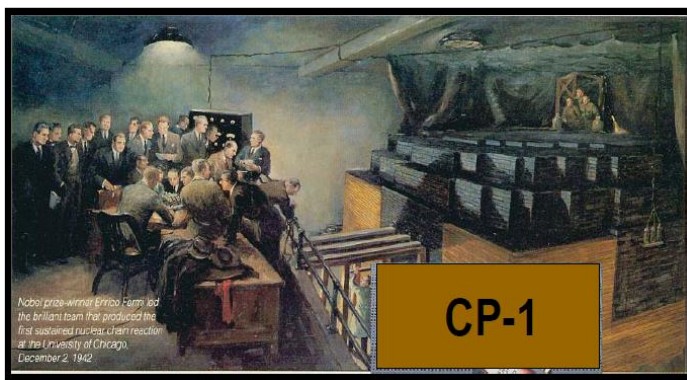
**Gambar 25** Sejarah IPTEK Nuklir Dunia sampai pertengahan tahun 1950-an (Sekimoto, 2002)

## 2.2 Sejarah Pemanfaatan Energi Nuklir

Pemanfaatan energi nuklir berasal dari proses riset dan pengembangan yang cukup lama yang akhirnya berasal dari penelitian yang dikembangkan oleh Dalton dengan teori Atom nya sekitar tahun 1800-an yang diikuti dengan berbagai penemuan terkait atom lainnya seperti sinar katoda, X-ray, peluruhan radioaktifitas sampai pada penemuan neutron dan proses fisi seperti yang digambarkan pada **Gambar 26**. Lebih jauh penelitian terkait proses reaksi inti atom dan experiment proses fisi dari bahan bakar nuklir berhasil dilakukan pada awal tahun 1940 an dengan experiment Fermi-nya seperti digambarkan dalam **Gambar 27** yang diikuti dengan berbagai penemuan dan test bahan nuklir lainnya sampai pada proses pembuatan bom dan pembangkit listrik serta untuk armada perang pada kapal selam dan kapal laut. Secara prinsip dasar pemanfaatan teknologi nuklir yang berasal dari energi yang dikeluarkan dari proses pembelahan inti, bisa dikategorikan berdasarkan besarnya daya yang dikeluarkan dan juga waktu pembangkitan daya tersebut sebagai operasional pembangkit.

**Gambar 28** menggambarkan pemanfaatan energi nuklir berdasarkan besar, waktu dan aplikasi yang dapat dipakai. Energi nuklir yang tinggi dalam waktu yang sangat singkat bisa terjadi sebagai akibat proses reaksi berantai yang sangat cepat dan tidak terkontrol sebagai bentuk dari Bom Nuklir atau

bahan ledakan lainnya dengan bahan bakar nuklir. Sementara proses fisi yang dapat dikontrol dengan waktu yang relatif lama bisa pakai untuk sebuah pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) dan juga untuk kapal selam, motor pendorong kapal dan juga lebih jauh untuk pesawat ulang alik luar angkasa. Energi yang dikeluarkan dalam reaktor cukup tinggi dan dikontrol prosesnya dalam jangka waktu 1-2 tahun, sedangkan untuk reaktor yang sangat lama bisa mencapai lebih dari 10 tahun bahkan 30 tahun, serupa dengan memanfaatkan nuklir untuk kapal selam dan juga pesawat ulang alik, di mana proses pergantian bahan bakar dan kontrol reaksi fisinya sekali dalam jangka waktu tersebut, seperti 1-2 tahun untuk reaktor saat ini atau 10-30 tahun untuk pesawat ulang alik.

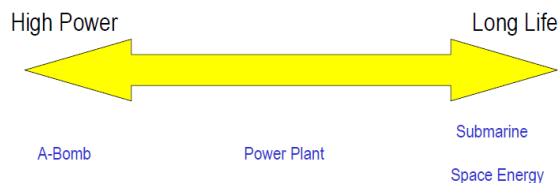


Sumber : H. Sekimoto, 2002, Catatan Kuliah Nuclear Engineering, Tokyo Institute of Technology

**Gambar 26** Experiment Fermi CP-1 di Universitas Chicago 1942 (Sekimoto, 2002)

### Utilization of High Density Energy

$$\text{Energy} = \text{Power} \times \text{Time}$$



Sumber : H. Sekimoto, 2002, Catatan Kuliah Nuclear Engineering, Tokyo Institute of Technology

**Gambar 27** Konsep dasar pemanfaatan energy nuklir (Sekimoto, 2002)



**Gambar 28** Kapal Selam Berpendorong Nuklir Pertama (Nautilus and Seawolf, 1953).

Pada periode pertama penggunaan energi nuklir adalah untuk tujuan militer seperti halnya sebuah reaktor pendorong kapal selam (*submarine*) (West & Davis, 2001) milik US “Nautilus”, dapat dilihat di **Gambar 29** jenis kapal selam nuklir. Penggunaan teknologi nuklir ini diikuti juga oleh Uni Soviet atau Rusia saat ini dan beberapa Negara lainnya untuk kebutuhan militer mereka. Dalam saat yang sama atau bahkan sebelumnya pemanfaatan energi nuklir juga dimanfaatkan untuk kepentingan militer atau perang dengan didesain sebagai senjata nuklir atau bom nuklir. Senjata mematikan tersebut telah digunakan Amerika Serikat untuk menghancurkan Jepang dan menjatuhkannya di Hiroshima dan Nagasaki dan diikuti dengan berakhirnya perang dunia II. Bentuk dan ukuran senjata Bom nuklir Amerika Serikat yang dijatuhkan di Hiroshima dan Nagasaki dapat dilihat pada **Gambar 30**.



Sumber : H. Sekimoto, 2002, Catatan Kuliah Nuclear Engineering, Tokyo Institute of Technology

**Gambar 30** Ukuran dan bentuk bom atom Hiroshima dan Nagasaki (Sekimoto, 2002)

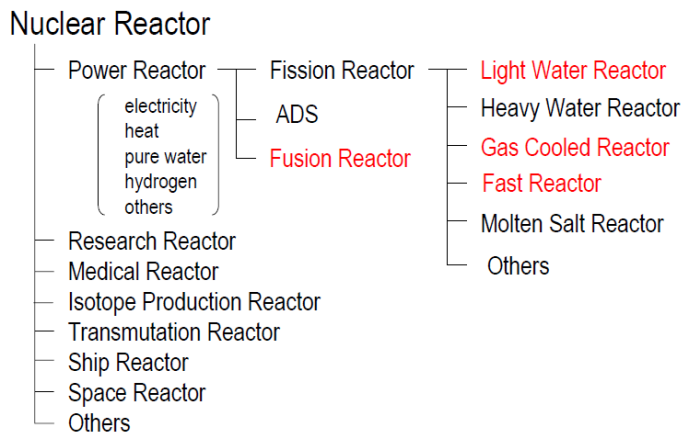


**Gambar 29** Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) pertama di Dunia (Obninsk APS-1, Soviet Union, 1954).

Dalam perkembangannya semenjak awal era revolusi industri, kemudian era peperangan dunia pertama, perlombaan negara-negara maju untuk bisa menguasai teknologi maju sudah dimulai sejak lama terjadinya. Pada era perang dunia kedua, penguasaan teknologi nuklir memungkinkan negara-negara tersebut membuat kapal-kapal perang dengan berpendorong nuklir dan memasukan bahan-bakar nuklir kedalam hulu ledak misilnya. Generasi pertama penggunaan energi nuklir adalah untuk tujuan militer seperti halnya sebuah reaktor pendorong kapal selam (*submarine*) (West & Davis, 2001) milik US “Nautilus”, diikuti juga oleh uni soviet atau rusia saat ini dan senjata mematikan seperti bom atom yang pernah di jatuhkan di Hiroshima dan Nagasaki pada akhir perang dunia II. Selepas perang duani kedua, dunia semakin sadar akan kehancurannya terutama akibat dijatuhkannya dua bom nuklir dijepang yang menyebabkan banyak korban jiwa. Pengembangan energi nuklir untuk tujuan sipil seperti reaktor nuklir untuk pembangkit daya dimulai secara intensif setelah konferensi genewa “*On the peaceful uses of atomic energy*” yang di sponsori oleh UN (PBB) tahun 1955. Teknologi nuklir untuk tujuan damai atau untuk menghasilkan listrik bagi penduduk telah dimulai pertama kalinya oleh pemerintah Rusia yang dibangun di daerah *Obninsk*, pada 27 Juni 1954 dengan daya 30 MW, seperti bisa dilihat pada **Gambar 31**, gedung reaktor tersebut dan sekarang sudah menjadi museum. Energi nuklir setelah era perang dunia kedua merupakan energi yang bertujuan kebutuhan sipil, seperti halnya untuk kebutuhan pertanian dan peternakan. Penggunaan teknologi nuklir juga bermanfaat pada peningkatan



kesehatan dan kedokteran, serta kebutuhan industri. Teknologi nuklir yang lebih umum digunakan adalah untuk pembangkit tenaga listrik yang dapat membantu supply energi bagi listrik nasional khususnya.

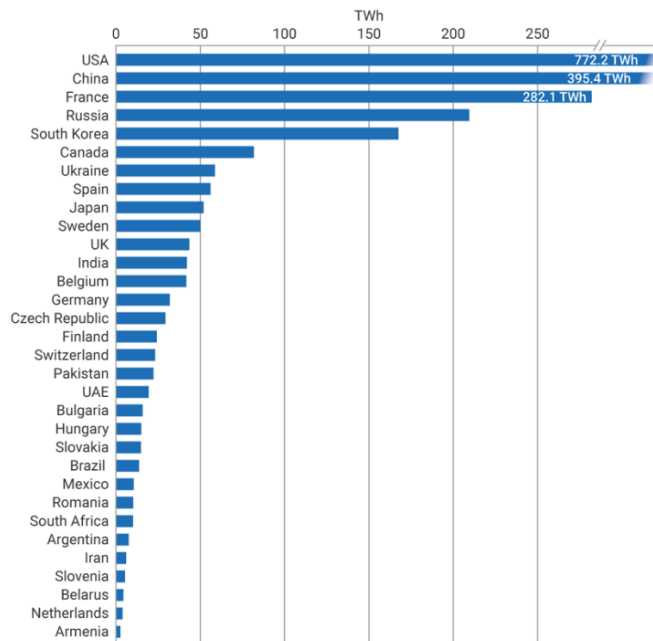


Sumber : H. Sekimoto, 2002, Catatan Kuliah Nuclear Engineering, Tokyo Institute of Technology

**Gambar 30** Pemanfaatan energi nuklir untuk tujuan damai dan Sipil (Sekimoto, 2002)

Teknologi nuklir yang lebih umum digunakan adalah untuk pembangkit tenaga listrik yang sampai saat ini telah beroperasi di lebih dari 30 negara yang berkontribusi 16% terhadap energi dunia. Indonesia sebagai sebuah negara yang berdaulat berperan aktif dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi khususnya di bidang teknologi nuklir dari sejak lama dan hampir dekat kepermulaan dicetuskannya penggunaan tenaga nuklir untuk tujuan damai. Pengalaman yang hampir 40 tahun lebih dalam mengoperasikan reaktor dan juga berbagai kontribusi di berbagai bidang baik di sektor pertanian, peternakan, farmasi, kedokteran, dan industri memperlihatkan kemampuan yang cukup untuk menembus ke level penggunaan teknologi nuklir untuk pembangkit tenaga listrik (Infometrik, 2023). Berbagai aplikasi yang telah diterapkan dengan memanfaatkan energi nuklir baik dari proses reaksi fisi maupun dari radioisotop yang berasal dari proses radioaktifitas. Pemanfaatan terbanyak energi nuklir dan mempunyai berbagai jenis berasal dari pembangkitan listrik atau PLTN seperti terlihat pada **Gambar 32**. PLTN ini berasal dari proses fisi nuklir yang terjadi didalam sebuah reaktor nuklir. PLTN yang berasal dari reaktor fisi telah menyebar di lebih dari 30 negara umumnya menggunakan teknologi light water reactor (LWR) atau reaktor berpendingin air ringan. Aplikasi PLTN juga bisa dipakai

untuk tidak hanya kebutuhan listrik saja, akan tetapi dapat diaplikasikan untuk memproduksi hidrogen, panas, desalinasi air dan lainnya. Kebutuhan akan farmasi, obat-obatan dan keperluan medis juga dapat dipenuhi dengan menggunakan radio isotop yang dapat diproduksi dari sebuah reaktor nuklir. Seperti yang telah dibahas sebelumnya, aplikasi energi nuklir juga bisa digunakan untuk transportasi kapal laut atau kapal selam dan tentunya lebih jauh dimasa datang dapat digunakan untuk pesawat ulang alik di luar angkasa dengan operasional reaktor yang cukup lama sebagai pendorong pesawat-pesawat tersebut.



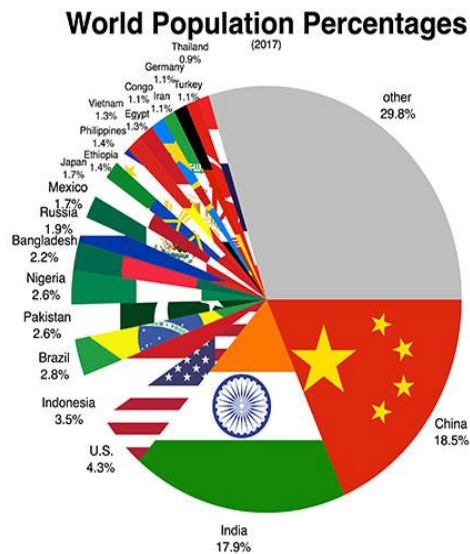
Sumber : <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx> ; IAEA PRIS

**Gambar 31** Negara negara yang memanfaatkan PLTN sebagai energi nasionalnya 2022 (World Nuclear Association, 2023; IAEA PRIS, 2022)

### 2.3 Perkembangan Teknologi Nuklir PLTN di Dunia

Negara-negara yang mengoperasikan PLTN didunia seperti tampak pada **Gambar 33** dengan konsumsi listrik dari PLTN yang bervariasi dan yang terbesar adalah negara Amerika Serikat, disusul Cina, Perancis, Rusia dan negara-negara lainnya dengan total 32 negara dan akan bertambah karena saat ini beberapa negara baru sedang dalam fase konstruksi di antaranya

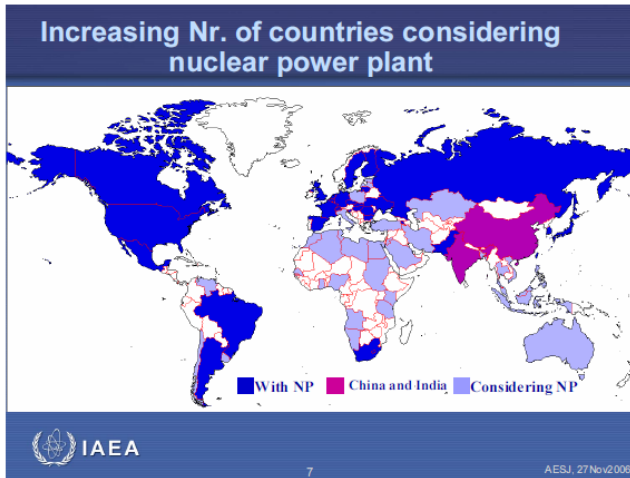
beberapa unit di negara Turki, Mesir dan Bangladesh. Di ASEAN yang berminat lama ingin membangun selain Indonesia adalah Filipina dan vietnam serta negara jiran kita malaysia.



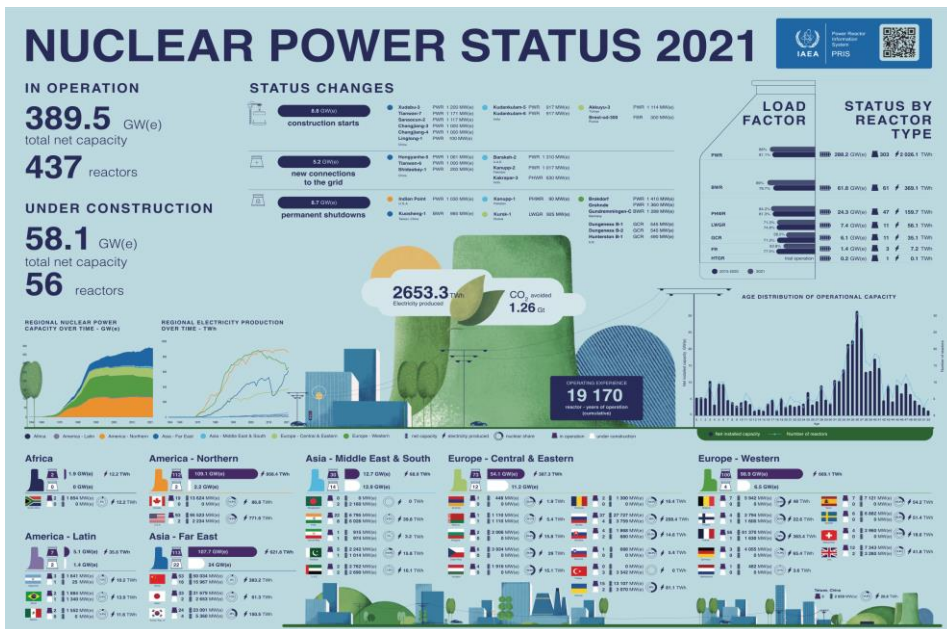
Sumber: (Wikimedia, 2017; [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:World\\_population\\_percentage.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:World_population_percentage.png))

**Gambar 32** Populasi Negara negara didunia (Wikimedia, 2017)

Berdasarkan populasi penduduk dunia dan persentase jumlah penduduk masing-masing negara seperti tampak pada **Gambar 34**, terlihat bahwa terdapat lebih dari setengah penduduk di dunia tinggal di negara Nuklir atau negara yang menggunakan PLTN di antaranya Cina, India, USA, Canada, negara-negara OECD, beberapa negara Amerika Latin dan lainnya, sehingga secara populasi lebih dari 50% penduduk dunia atau bahkan lebih dari 60%. Indonesia sendiri sebagai negara yang mempunyai penduduk terbesar keempat di dunia, masih belum mempunyai PLTN yang beroperasi, sementara negara populasi no. 1 sampai no 6 dunia kecuali Indonesia sudah mengoperasikan PLTN sejak lama. Ditambah lagi saat ini Banglades, Mesir dan Turki telah memasuki fase pembangunan PLTN mereka, sementara UEA telah membangun 4 unit PLTN terbarunya dan sudah beroperasi komersial 3 unit.



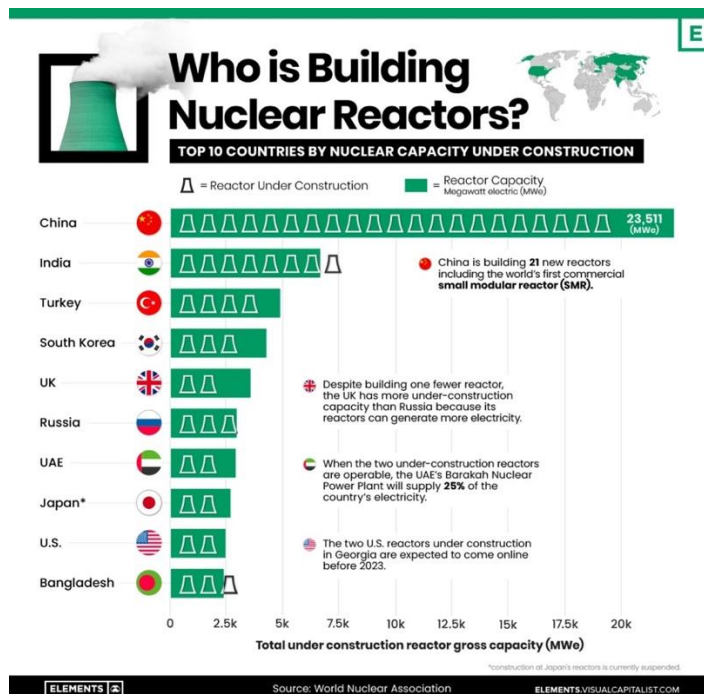
Gambar 33 Sebaran negara-negara yang memanfaatkan dan berminat menggunakan PLTN (Omoto, 2007)



Gambar 34 Status PLTN 2021 dan negara negara yang mengoperasikan PLTN (World Nuclear Association (WNA), 2023).

Seperti dijelaskan sebelumnya, teknologi nuklir untuk tujuan damai atau untuk menghasilkan listrik bagi penduduk telah dimulai pertama kalinya oleh pemerintah rusia di daerah *Obninsk*, pada 27 Juni 1954 dengan daya 30 MW. Energi nuklir setelah era perang dunia kedua merupakan energi yang

bertujuan kebutuhan sipil, seperti halnya untuk kebutuhan pertanian dan peternakan. Penggunaan teknologi nuklir juga bermanfaat pada peningkatan kesehatan dan kedokteran, serta kebutuhan industri. Teknologi nuklir yang lebih umum digunakan adalah untuk pembangkit tenaga listrik yang dapat membantu supply energi bagi listrik nasional khususnya seperti yang digambarkan pada **Gambar 35**. Pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) didunia sampai 2021 berjumlah 437 buah yang sedang beroperasi secara komersial di 32 negara. Total daya yang dihasilkan 389,5 GWe yang berkontribusi 10% terhadap energi dunia seperti yang digambarkan pada **Gambar 36**. Jumlah reaktor nuklir komersial untuk energi di atas belum termasuk reaktor nuklir untuk tujuan riset dan pengembangan di pusat riset dan pengembangan, industri dan universitas.



Source : visualcapitalist, 2023 : <https://elements.visualcapitalist.com/nuclear-reactors-under-construction/>

**Gambar 35** Sebaran di antara beberapa negara yang sedang membangun PLTN (visualcapitalist, 2023).

Amerika serikat mempunyai fasilitas PLTN terbanyak didunia, yaitu sekitar 93 unit PLTN saat ini dengan kontribusi 18% listrik disana dari total kebutuhan energi listrik AS yang beroperasi di 30 negara bagian negara tersebut, dan berkontribusi sebanyak 30% terhadap PLTN dunia. Di beberapa

negara lainya, kontribusi energi nuklir terhadap pasokan listrik nasional cukup signifikan dari total kebutuhan listrik nasional mereka seperti di Prancis sebanyak 75% dari total kebutuhan bauran energi nasionalnya, Belgia 50%, Swedia 40%, Korea Selatan 28% (2030 : 30%), Hongaria 46%, Swiss 34-40%, Jepang 4% (2030 : 20-22%), Finlandia 33%, Spanyol 21%, Inggris 15%, Republik Czech 36% (2040 : 40%), Kanada 14%, Mexico 3%, Belanda 3%, dan lain sebagainya (World Nuclear Association (WNA), 2023) . Saat ini sedikitnya ada sekitar 56 PLTN baru yang dalam tahap pembangunan seperti yang juga nampak pada sebaragam Negara-negara yang berpotensi memanfaatkan PLTN pada **Gambar 37**.

**Rising expectation**

- ❑ **Paris Ministerial Conference (21-22 March 2005)**
  - 74 MSs, and 10 International Organisations
  - Of 32 Ministers, or statements on behalf of Ministers
    - 13 from MSs without Nuclear Power, of which;
      - ✓ 8 Indicated positive move to nuclear power
      - Morocco, Indonesia, Iran, Poland, Turkey, Bangladesh, Egypt, Vietnam
- ❑ **Other MSs that have expressed interest in Nuclear Power on various occasions**
  - Chile, Malaysia, Thailand, Uruguay, Algeria, Tunisia, Tanzania, Nigeria, Sudan... 30 Plus countries listed

MINISTERIAL CONFERENCE  
PARIS • 21-22 MARCH 2005  
  
Nuclear Power for the 21<sup>st</sup> Century  
Addressing Energy Needs and Environmental Challenges

IAEA

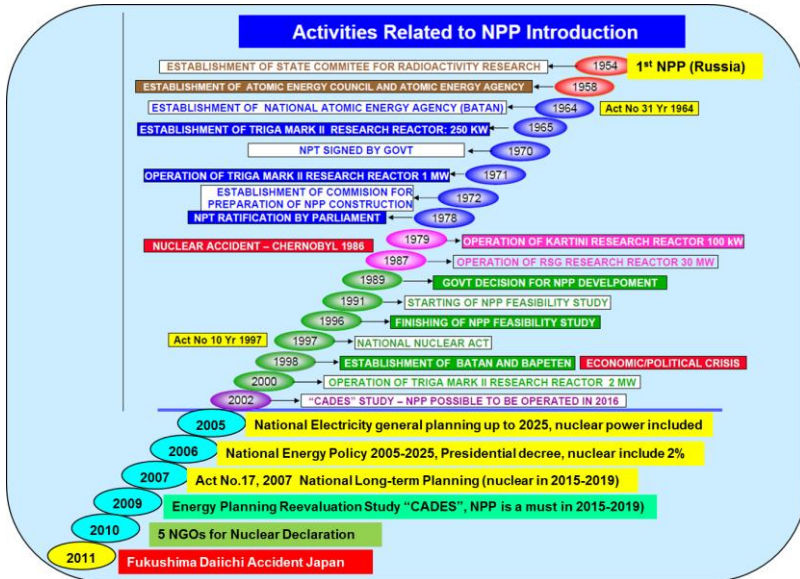
6

AESJ, 27 Nov 2006

**Gambar 36** Spekiraan beberapa negara baru yang berminat menggunakan PLTN dimasa datang (Global, 2005).

Hal ini memperlihatkan sebuah indikasi ketertarikan negara-negara khususnya negara berkembang untuk turut andil dalam perkembangan Teknologi Nuklir. Penggunaan reaktor nuklir juga dapat menghasilkan produksi hidrogen untuk keperluan transportasi yang bersih dan keperluan destilnasi air dengan memanfaatkan kelebihan panas. Non proliferation treaty (NPT) atau perjanjian non-proliferasi nuklir mengisyaratkan adanya kemauan yang begitu keras akan penggunaan teknologi nuklir untuk tujuan damai atau sipil, di mana setiap bahan bakar nuklir di proteksi dan di awasi terutama proses pengayaan dan daur ulang limbah bahan bakar. Pada mulanya perjanjian ini adalah hanya pada ke 5 negara besar pemilik senjata nuklir agar tidak melakukan transfer terknologi senjata nuklir ke Negara lain.

Saat ini program itu juga bertujuan untuk pengurangan produksi dan penghancuran senjata nuklir.



**Gambar 37** Riset dan pengembangan Teknologi Nuklir Indonesia (Badan Tenaga Nuklir Nasional, 2003)

Dua penghargaan nobel untuk IAEA sebuah organisasi energi nuklir dunia dan ketuanya Muhammad Al-Baradei pada bulan oktober 2005 juga merupakan babak baru bagi perhatian dunia terhadap energi nuklir untuk keperluan damai dan keperluan sipil. Beberapa faktor di atas mengemuka dan menjadi fase baru “renaissance” bagi nuklir saat ini dan yang akan datang, hal tersebut juga terungkap dalam sebuah konferensi internasional di Jepang *GLOBAL 2005 Nuclear energy system for future generation and global sustainability* yang dihadiri oleh 32 negara dan lebih dari 500 peserta. Teknologi nuklir merupakan teknologi yang telah lama beroperasi dan *well establish* sehingga dapat memenuhi kebutuhan energi terutama energi masa depan dalam waktu yang relatif lama. Pemanfaatan energi nuklir untuk tujuan damai dan kebutuhan sipil merupakan sebuah kesadaran bersama baik ditingkat global maupun nasional. Keberhasilan mengurangi emisi CO<sub>2</sub> yang berdampak pada pemanasan global dan dapat memenuhi tuntutan Kyoto protocol merupakan sebuah dampak signifikan bagi lingkungan global dari penggunaan nuklir. Produksi hidrogen untuk transportasi yang bersih dan upaya destilasi air adalah dampak lain dari penggunaan kelebihan panas dari sebuah PLTN. Kemajuan NPT dan penghargaan internasional bagi

kemajuan IAEA dan dengan agresif nya program PLTN Negara-negara dunia khusus nya di Asia, merupakan awal dari renaissance teknologi nuklir bagi masa sekarang dan yang akan datang seperti yang digambarkan pada **Gambar 38**.

## 2.4 Pemanfaatan Teknologi Nuklir di Indonesia

Sebagai sebuah bangsa yang besar dan merupakan bagian dari penduduk dunia yang mempunyai keinginan untuk mengembangkan kemampuan bangsanya dalam hal teknologi khususnya untuk memenuhi kebutuhan energi dalam negeri, bangsa Indonesia menyadari pentingnya hal itu, sehingga muncul keinginan untuk membangun dan mempunyai sendiri fasilitas teknologi nuklir yang dioperasikan di dalam negeri. Kegiatan yang berkaitan dengan teknologi nuklir telah dimulai sejak tahun 1954 yang merupakan saat kali pertama PLTN didunia diresmikan di rusia seperti terlihat pada **Gambar 39**. Panitia negara tersebut diberi tugas menyelidiki kemungkinan adanya sebaran radioaktif yang berasal dari aktivitas percobaan senjata nuklir beberapa negara maju di perairan Laut Pasifik. Kemudian dilanjutkan dengan dibentuknya Dewan Tenaga Atom dan Lembaga Tenaga Atom (LTA) empat tahun kemudian, tepatnya 5 Desember 1958 melalui Peraturan Pemerintah No. 65 tahun 1958. Peraturan Pemerintah tersebut dibentuk dalam rangka pendayagunaan dan pemanfaatan tenaga atom bagi kesejahteraan masyarakat.

Satu tahun sebelum nya, pada 1957, Indonesia bergabung menjadi anggota IAEA (International Atomic Eenergy Agency). Keinginan untuk terus mengembangkan sendiri dalam aspek riset dan pengembangan ketenaganukliran terus berkembang, hal ini terungkap dari gagasan-gagasan yang muncul pada seminar tenaga atom pertama diselenggarakan bersama oleh Institut Teknologi Bandung (ITB) dan Lembaga Tenaga Atom (LTA) di Bandung pada tahun 1962. Dua tahun berselang tepatnya 1964, didirikanlah BATAN melalui Undang Undang No. 31 Tahun 1964 tentang Ketentuan-ketentuan Pokok Tenaga Atom., dan kegiatan implementasi dari pertemuan di Bandung tersebut telah dilakukan beberapa studi introduksi PLTN di Indonesia yang secara efektif telah dimulai sejak tahun 1972 dengan pembentukan Komisi Persiapan Pembangunan-PLTN (KP2-PLTN), dan berlangsung hingga saat ini seperti yang digambarkan sejarah ilmu



pengetahuan nuklir pada Gambar 39. Untuk itu diperlukan proses penelitian dan pengembangan ketenaganukliran yang diikuti dengan dibangunnya reaktor riset. Proses penelitian dan pengembangan dalam teknologi reaktor di mulai dengan dibangunnya tiga reaktor riset dan fasilitas penunjang lainnya seperti tergambar dalam **Gambar 40** untuk ketiga lokasi reaktor riset tersebut. Dua dari jenis Triga Mark (Amerika) dan satu reaktor serba guna yang di desain Jerman.



**Gambar 40** Reaktor riset yang dibangun dan beroperasi di Indonesia (Hastowo, 2005).

Reaktor pertama di Indonesia, Triga Mark II merupakan reaktor termis dengan elemen bakar  $U^{235}$  diperkaya 20%, dan pendingin air. Reaktor tersebut berlokasi di Bandung, di samping kompleks kampus Ganesha Institute Teknologi Bandung (ITB) dengan menempati lahan seluas 3 hektar, yang diresmikan pada tahun 1965, oleh Presiden Republik Indonesia pertama (Ir. Soekarno), dengan daya 250 kW. Setelah beroperasi, reaktor Triga Mark II tersebut kemudian dinaikkan dayanya menjadi 1 MW (1971) dan pada tahun 2000, kembali dayanya dinaikkan menjadi 2 MW. Reaktor Bandung tersebut, dibangun sebagai fasilitas yang diperuntukkan untuk kegiatan penelitian dan pembinaan keahlian, litbang bahan dasar, radioisotop dan senyawa bertanda, instrumentasi dan teknik analisis radiometri, pengawasan keselamatan kerja

terhadap radiasi dan lingkungan. Reaktor tersebut juga memfasilitasi beberapa laboratorium di antaranya, laboratorium fisika, kimia dan biologi, produksi isotope dan senyawa bertanda, dan juga terbentuknya klinik kedokteran nuklir pertama di Indonesia. Dari kawasan ini, merupakan embrio berdirinya Unit Kedokteran Nuklir di Rumah Sakit Hasan Sadikin (RSHS), Bandung.

Reaktor kartini adalah reaktor riset kedua dengan reaktor jenis yang sama dengan Triga Mark II, yang merupakan hasil kerja ilmuwan dan tenaga Indonesia dengan arahan General Atomic Amerika. Reaktor dengan daya 100 kW tersebut diresmikan tahun 1979. Kawasan reaktor ini mendiami lokasi seluas 8.5 hektar di kawasan Yogyakarta. Fasilitas yang ada di antaranya fasilitas perangkat subkritik, laboratorium bahan murni, akselerator, laboratorium penelitian D2O, laboratorium fisika dan kimia nuklir, fasilitas keselamatan kerja dan kesehatan, perpustakaan, fasilitas laboratorium untuk pendidikan, pusat teknologi akselerator dan proses bahan, serta sekolah tinggi teknologi nuklir (STTN). Satu tahun setelah diresmikannya reaktor Bandung, pada tahun 1966 pusat penelitian atom pasar jumat Jakarta, didirikan dengan menempati lahan 20 hektar.

Fasilitas yang dikembangkan dikawasan ini adalah tiga unit Iradiator Gamma Kobalt-60, 2 mesin berkas elektron, laboratorium pengolahan uranium, perangkat alat ukur radiasi, laboratorium kimia, biologi, proses dan hidrologi, fasilitas pendidikan dan latihan, serta gedung peragaan sains dan teknologi nuklir (Perasten). Fasilitas yang ada di pasar jumat yang juga teridir dari beberapa unit organisasi di Batan, di antaranya, pusat aplikasi teknologi Isotop dan radiasi, pusat teknologi keselamatan dan meteorologi radiasi, pusat pengembangan geologi nuklir, pusat pendidikan dan pelatihan serta pusat diseminasi iptek nuklir. Dari kawasan pasar jumat ini telah dilakukan berbagai aktivitas penelitian dan pengembangan terkait radioisotop, penelitian radiasi dan juga aplikasinya diberbagai bidang. Aplikasi tersebut di antaranya penelitian dan pengembangan eksplorasi dan pengolahan bahan nuklir, geologi dan geofisika, keselamatan radiasi dan biomedika nuklir, pendidikan dan pelatihan serta kegiatan sosialisasi hasil penelitian dan pengembangan iptek nuklir kepada masyarakat. Reaktor ketiga dibangun dengan nama G.A. Siwabessy pada tahun 1987, setahun setelah tragedi kecelakaan cernobyl terjadi, tahun 1986, menempati area seluas 25 hektar di kawasan Serpong, Tangerang, Banten dengan daya 30 MW. Reaktor ini

menggunakan elemen bakar lokal (buatan Indonesia). Reaktor yang pertama, kedua, maupun ketiga banyak menghasilkan kerja sama dengan berbagai universitas dan instansi lain, dan banyak sarjana dan pasca sarjana yang dihasilkan.

Reaktor G.A Siwabessy ini dibangun didorong oleh kebutuhan untuk mendukung pengembangan industri nuklir dan persiapan pembangunan serta pengoperasian PLTN di Indonesia. Pembangunan instalasi dan laboratorium kawasan nuklir serpong dilakukan melalui tiga fase yang dimulai sejak 1983 dan selsesai keseluruhan tahun 1992. Kawasan serpong ini terletak di kawasan pusat penelitian ilmu pengetahuan dan teknologi (Puspitek). Fasilitas yang juga ada selain reaktor riset di antaranya fasilitas instalasi elemen bakar reaktor riset, instalasi radioisotop dan radiofarmaka, instalasi radiometalurgi, instalasi element bakar eksperimental, instalasi pengolahan limbah radioaktif, instalasi radiometalurgi, instalasi keselamatan dan keteknikan reaktor, fasilitas pengembangan informatika, instalasi mekano elektronik nuklir, instalasi spektrometri neutron, serta instalasi penyimpanan element bakar bekas dan terkontaminasi.

## **2.5 Pengalaman Indonesia dalam Pengembangan Teknologi Nuklir**

Tidak bisa dipungkiri bahwa pengalaman adalah guru yang terbaik dan dari pengalaman itulah akan menambah semangat dan kemantapan dalam menjalani kehidupan yang akan datang. Serupa dengan pemanfaatan teknologi dudunia, pengalaman berbagai negara akan sangat berpengaruh dan berperan penting dalam perkembangan teknologi tersebut dalam hal ini aspek riset dan pendidikan menjadi tonggak paling penting dalam sejarah. Dalam hal kemampuan ketenaga nukliran, Indonesia telah mempunyai pengalaman lebih dari 60 tahun dalam hal yang berkaitan dengan riset dengan pemanfaatan energi nuklir dan lebih dari 58 tahun untuk penanganan operasional reaktor sejak dibangunnya reaktor pertamanya dibanding tahun 1965. Dari ketiga reaktor yang telah beroperasi di Indonesia tersebut, telah banyak dihasilkan produk-produk untuk kebutuhan dalam negeri maupun export. Baik dalam bidang pertanian, kedokteran, obat-obatan, industri dan lainnya. Penggunaan energi nuklir untuk tujuan pembangkit tenaga listrik masuk dalam program jangka menengah dan panjang di mana tidak hanya

kesiapan sumber daya manusia saja, akan tetapi berbagai pertimbangan lainnya termasuk financial, aspek sosial masyarakat dan perkembangan politik baik nasional, regional maupun internasional. Pengalaman mengoperasikan reaktor merupakan sebuah batu loncatan untuk memenuhi standar kemampuan dalam mengoperasikan reaktor dengan tujuan memproduksi listrik yang lebih besar lagi. Selama 58 tahun tersebut proses riset dan pengembangan telah dilakukan baik dari operasi reaktor, testing reaktor, pembuatan bahan bakar nuklir, termasuk bagaimana manajemen limbah bahan bakar nuklir.

Berbagai studi banding dan pelatihan telah dilakukan dan bekerja sama dengan IAEA untuk mensupervisi indonesia dalam hal persiapan menuju pembangunan PLTN pertama di Indonesia. Pengalaman Indonesia itu dapat dibandingkan dengan pengalaman negara-negara Asia lainnya di antaranya India dan Jepang yang dimulai proyek reaktor risetnya sekitar tahun 1957 dan diikuti beberapa negara lainnya. Pengalaman Indonesia ini merupakan pengalaman yang sangat berharga dan perlu di apresiasi karena betapa mahalny sebuah proses riset dan pengembangan khususnya dalam rangka memenuhi kebutuhan dan kesejahteraan rakyat Indonesia. Dan Hal itu juga bisa menjadi bagian berharga bagi negara lain yang dapat belajar dari pengalaman Indonesia.

## **2.6 Evaluasi Kebijakan Energi Nasional dan Energi Nuklir**

Krisis ekonomi menimpa beberapa negara di asia termasuk Indonesia sekitar tahun 1997-1998 telah merubah beberapa rencana strategis secara dramatis, terutama dalam memenuhi kebutuhan energi nasional. Di samping itu pula seiring dengan meningkatnya pertumbuhan penduduk dan semakin terbatasnya sumber daya alam yang tersedia, sehingga terjadi kekurangan pasokan listrik terutama dalam negeri khususnya di luar pulau jawa, terjadi pemutusan bergilir dalam mengurangi beban listrik pelanggan. Sebagai negara yang besar dan banyak penduduknya yang terdiri atas lebih dari 15 ribu pulau yang tersebar diseluruh indonesia, menjadi sebuah keunikan tersendiri khususnya sebagai negara kepulauan dalam mengatasi kendala yang ada di samping itu pula sudah barang tentu perbedaan kultur dapat menjadi persoalan tersendiri. Jaringan listrik di Indonesia terbagi menjadi 2 daerah yaitu daerah jawa-bali dan diluar jawa-bali. Jaringan listrik jawa-bali

sudah relatif stabil, sehingga pembangunan pembangkit tenaga listrik yang baru adalah pilihan yang baik untuk menambah kapasitas produksi, tetapi saat ini masih terjadi over kapasitas dari daya yang diproduksi di Jawa sampai sebelum 2030. Kemudian untuk daerah luar Jawa-Bali, laju konsumsi listrik relatif kecil dan jaringan listrik pun belum relatif stabil dan belum tersebar dalam area yang luas, oleh karena itu pembangunan pembangkit listrik skala kecil merupakan pilihan yang efektif dalam menambah kapasitas produksi dalam daerah ini.

Daerah Jawa-Bali yang merupakan 7% dari wilayah Indonesia, mempunyai konsumsi listrik sekitar 75% dari total konsumsi listrik Indonesia, hal ini dikarenakan bahwa populasi di Jawa-Bali adalah sekitar 65% dari jumlah penduduk Indonesia. Laju perkembangan konsumsi listrik di daerah Jawa-Bali sekitar 7% dan di daerah luar Jawa-Bali sekitar 10%, sehingga terlihat bahwa kenaikan kebutuhan akan listrik di daerah luar Jawa-Bali menjadi lebih prioritas. Secara garis besar, pembangkit listrik di Jawa-Bali masih didominasi oleh pembangkit listrik berbahan bakar minyak, gas dan batu bara. Pembangkit listrik lainnya seperti tenaga air berkontribusi sekitar 14%, sementara energi panas bumi berkontribusi sekitar 4% dari total kapasitas produksi listrik di Jawa-Bali. Secara garis besar penggunaan energi listrik di Indonesia dikategorikan dalam konsumen rumah tangga dengan 42,4% konsumsi listrik, konsumen untuk bisnis 18,5%, konsumen industri 32,3% dan yang lainnya 6,8% (sosial, gedung pemerintah dan penerangan jalan umum) (PLN, 2022).

Keputusan pemerintah untuk pengembangan PLTN di Indonesia telah dikeluarkan pada tahun 1989 yang kemudian 2 tahun setelah itu dimulai studi perencanaan tentang kemungkinan dibangunnya PLTN di Indonesia. Studi perencanaan tersebut dilakukan sampai tahun 1996. Pada tahun 1997 dan mengacu pada keputusan pemerintah No. 10 tahun 1997, Indonesia sudah mempersiapkan untuk pembangunan Pembangkit listrik tenaga nuklir berdasarkan pada prediksi laju konsumsi energi diharapkan sudah dibangun sekitar 2007 atau bahkan lebih cepat dari itu. Akan tetapi, berkaitan dengan krisis ekonomi yang terjadi, maka untuk sementara waktu proyek tersebut di mundurkan dan di jadwalkan kembali. Dan dalam bulan Januari 2003 dalam seminar mengenai rencana nasional energi dengan opsi energi nuklir, menteri energi dan sumber daya mineral telah merencanakan untuk

dioperasikannya pembangkit tenaga nuklir yang pertama pada tahun 2016 dengan demikian pembangunannya dapat di mulai sekitar 2010-2011.

Berdasarkan keputusan Sistem nasional untuk riset, pengembangan dan aplikasi ilmu pengetahuan dan teknologi telah di tetapkan oleh DPR RI dalam sebuah ketetapan No. 18 tahun 2002. Keputusan hukum ini menjadi sebuah penguat berkaitan dengan strategi penembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di indonesia khususnya berkaitan dengan penggunaan tenaga nuklir. Dalam perjalanannya kementrian reset dan teknologi yang berkoordinasi dengan istitusi reset dan pengembangan, universitas sebagaimana bekerja sama dengan industri dan NGO-NGO untuk membuat “*landmarks* 2020 di mana difikuskan pada keamanan suplai makanan dan energi yang merupakan dua poin yang Sangay penting tidak hanya berkaitan dengan kebutuhan untuk bertahan hidup, akan tetapi juga untuk pembangunan berkelanjutan.

Dari hasil kerja sama Indonesia dan IAEA telah melakukan studi dengan dinamani (*Comprehensive Assesment of Different Energy Sources (CADES) for Generation in Indonesia*) yang bertujuan untuk meneliti dan membuat sebuah berbagai sumber dalam alam untuk produksi listrik nasional telah menunjukkan hasil yang memadai dalam penerapan energi nuklir di indonesia sebagai salah satu opsi. Laporan tersebut telah secara resma di laporkan ke IAEA bulan agustus 2003. Laporan tersebut memperlihatkan strategi energi mix nasional yang akan di terapkan di Indonesia dari berbagai sumber daya alam yang tersedia termasuk penggunaan tenaga nuklir. Untuk jawa-bali Pembangkit listrik tenaga nuklir tersebut akan dimulai beroperasi sekitar 2016. Total kontribusi 5% dari total energi listrik nasional atau sekitar 6,000 MWe pada tahun 2025.

Pemerintah Indonesia khususnya kementrian energi dan sumber daya mineral membuat sebuah upaya memadukan semua potensi sumber daya alam yang ada baik dari bahan fosil, terbarukan dan nuklir dengan mempertimbangkan kemampuan sumber daya manusia, aspek ekonomi, social dan politik. Konsep kebijakan energi *mix* nasional, dengan memasukan opsi energi nuklir terdapat dalam cetak biru energi nasional pada departemen energi Indonesia, guna memenuhi kebutuhan energi untuk pemenuhan listrik nasional dalam 1 dan 2 dasawarsa ke depan. Proses kebijakan energi mix nasional menitik beratkan pada pemenuhan kebutuhan energi nasional

dari berbagai alternative sumber daya alam lainnya selain bahan bakar fosil. Kebijakan energi mix untuk tahun 2025 masih di dominasi bahan baker fosil dengan komposisi batubara 32,7 %, Gas bumi 30.6%, minyak bumi 26.2%, PLTA 2.4%, panas bumi 3.8% dan lainnya 4.4%. Energi nuklir masuk pada komposisi lainnya dengan kontribusi 1.993% terhadap kebutuhan energi nasional.

Khusus berkaitan dengan pemanfaatan energi nuklir, dibagi menjadi beberapa tahapan pembangunan. Tahapan pembangunan awal, akan dibangun 2 buah PLTN yang ditargetkan dapat beroperasi mulai 2016 dan 2017 sehingga apabila waktu yang diperlukan untuk membangun sebuah PLTN sekitar 5 tahun, dapat diperkirakan mulai tahun 2010 atau 2011 harus dapat dibangun kedua PLTN tersebut. Periode kedua direncanakan dibangun 2 buah PLTN juga yang diperkirakan dapat beroperasi pada tahun 2023 dan 2024. Total daya yang diinginkan adalah 10 GWe dengan target harga per kWh < 4 cUS\$. Berbagai upaya telah dan sedang dilakukan baik dari pihak pemerintah, universitas dan lembaga riset yang ada untuk mengadakan sosialisasi dan *road show* termasuk didalamnya dialog bersama parlemen, masyarakat, NGO dan lembaga profesi lainnya. Progres terbaru dalam implementasi program PLTN di Indonesia yang diperlukan masuk dalam sistem kelistrikan Indonesia pada tahun 2015-2019 seperti terungkap dalam perpres No.5 tahun 2006 dan Undang-undangan No 17 tahun 2007. Target operasional reactor pada tahun 2015-2019 merupakan amanah undang-undang yang tentunya merupakan amanah bagi pemerintah untuk menjalankannya. Kecuali ada amanah undang-undang yang membatalkannya. Perkiraan masuknya PLTN didalam tahun 2015 akan sangat sulit terwujud karena untuk waktu pembangunan satu unit PLTN membutuhkan kurang lebih 5 tahun atau lebih, oleh karenanya minimal apabila tahun 2011 sudah ada keputusan dibangun, berarti 2016/2017 PLTN sudah bisa masuk ke sistem kelistrikan nasional. Faktor krisis nuklir Fukushima saat ini menjadi tantangan yang berat bagi implementasi PLTN di Indonesia meskipun sudah merupakan amanah undang-undang. Dan amanah undang-undang ini tersiratkan bahwa Indonesia akan membangun PLTN yang aman yang dapat mensejahterakan masyarakat.

Oleh karenanya persiapan SDM, pemilihan tempat dan aspek sosial menjadi salah satu konsern yang sudah lama dijalankan, demikian juga aspek ekonomis dan lingkungan. Reaktor yang akan dibangun harus lebih aman

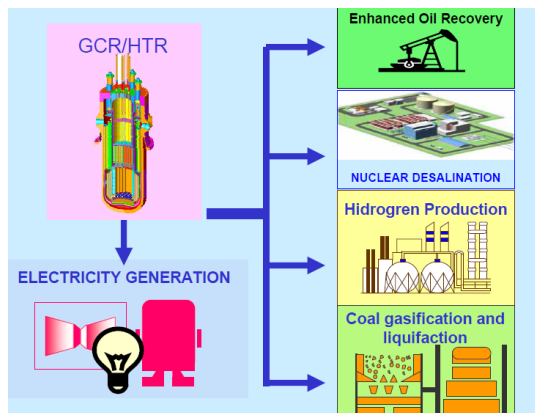
dari PLTN Fukushima yang merupakan generasi tua reaktor yang ada dan sudah beroperasi 40 tahun lebih. Akan adanya keterlambatan bagi implementasi pembangunan PLTN di Indonesia merupakan tantangan berat pemerintah dan juga dunia industri yang tertarik untuk mengembangkan industri nuklir di Indonesia, terutama menjelaskan kepanikan psikologis masyarakat dari efek berlebihan berita yang ada di masyarakat. Tentunya program sosialisasi, pendekatan masyarakat, serta komitmen regulasi dalam hal ini pemerintah yang akan bertanggung jawab atas keputusan implemetasi adalah hal yang sangat di perlukan masyarakat. Masyarakat baik setelah maupun sebelum adanya tragedi Fukushima Jepang, juga baik implementasi program apapun, di bidang transportasi misalkan, akan senantiasa meminta jaminan pemerintah sebagai garantor atau penanggung jawab dari semua kegiatan yang pemerintah putuskan terutama pada saat kejadian bencana terjadi. Jangan sampai lepas tangan dalam pengelolaan dan regulasi apalagi dalam keadaan darurat bencana, tetapi pemerintah akan langsung tanggap dan bertanggung jawab atas semua implemetasi kebijakan yang pemerintah buat.



### 3. AKTIVITAS PENGEMBANGAN IPTEK NUKLIR

#### 3.1 Aplikasi Energi Nuklir: Energi dan Non Energi

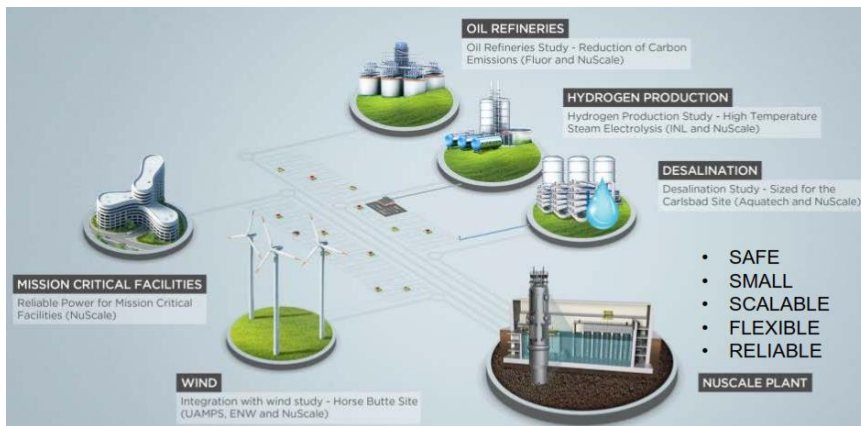
Secara umum, pemanfaatan energi nuklir dapat dibagi menjadi dua bagian, yaitu aplikasi energi dan non energi. Untuk aplikasi energi, termasuk di antaranya untuk pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) dan aplikasi kogenerasi energi, seperti proses desalinasi air untuk air bersih, produksi hidrogen untuk bahan bakar, untuk aplikasi gasifikasi dan pencairan batu bara dan aplikasi *enhanced oil recovery* (EOR). Seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 41** dan **Gambar 42** bahwa penerapan energi nuklir dapat dimanfaatkan untuk produksi listrik dan aplikasi nuklir kogenerasi serta untuk sistem integratif dengan energi terbarukan (Bruckner et al., 2014). Kemudian strategi *system hybrid* antar-pembangkit nuklir dengan energi terbarukan juga dapat dilakukan untuk optimalisasi *based load* dan aspek intermitensi atau sistem *load follower*. Sisa panas dari pembangkit yang tidak digunakan untuk konversi listrik melalui turbin dapat digunakan untuk kogenerasi secara langsung atau kombinasi panas sisa dan listrik dari pembangkit yang dihasilkan.



**Gambar 38** Aplikasi nuklir untuk listrik dan ko-generasi (produksi kelebihan panas / *excess heat*) (Reyes & Hopkins, 2018; World Nuclear Association, 2021)

Dalam aplikasi non-energi meliputi produksi radioisotop untuk keperluan kesehatan dan kedokteran, farmasi, baterai nuklir, industri logam, lingkungan pertanian, peternakan, dan lain-lain seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 43**. Aplikasi ini juga memiliki pasar yang lebih luas untuk diimplementasikan terutama untuk aplikasi farmasi, medis dan kesehatan

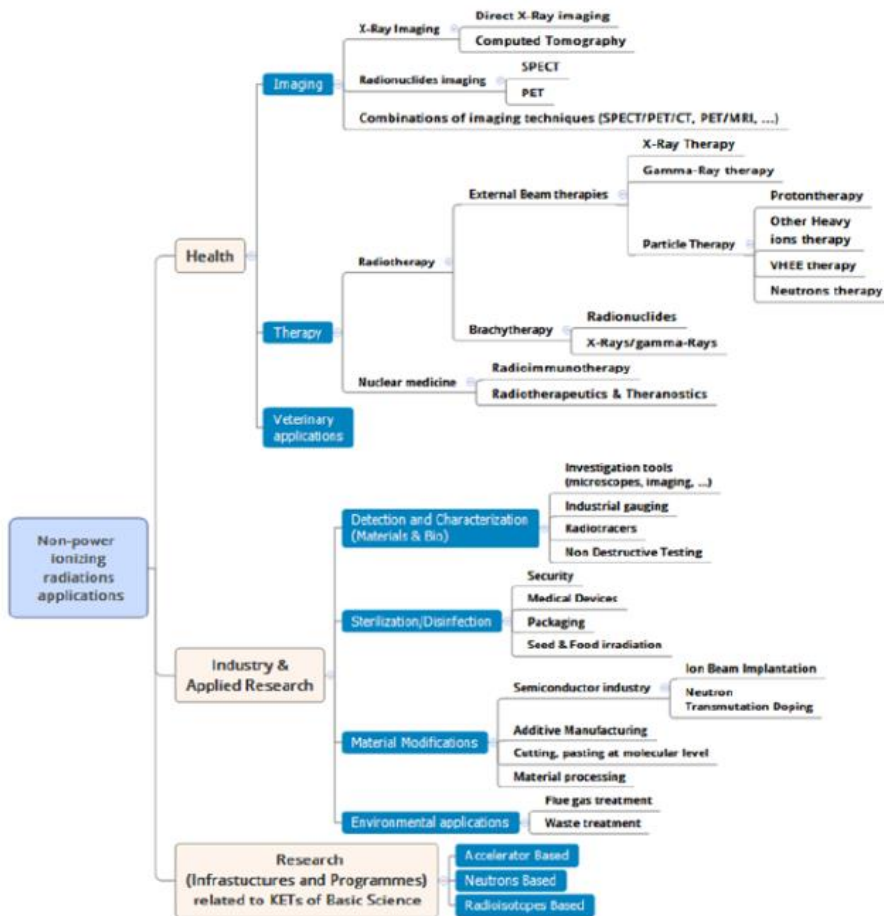
dengan aplikasi nuklir dari radioisotop yang dihasilkan dari reaktor serta beberapa fasilitas nuklir lainnya seperti akselerator. Aplikasi non-energi tersebut untuk aplikasi Kesehatan, Riset Industri dan Terapan serta untuk Riset infrastruktur dan program lainnya (Bezdek, 2021). Berdasarkan data dari Global Market for Radiation Applications, memperlihatkan bahwa market global untuk teknologi *non-energy application* dari teknologi Nuklir dapat mencapai lebih dari 500 miliar dolar Amerika (USD) atau sekitar 7.500 triliun rupiah (kurs 1 USD setara Rp15.000,00), dan akan terus berkembang secara cepat (Bezdek, 2021).



**Gambar 39** Program Inisiatif NuScale Diverse Energy Platform (NuDEP) (IAEA, 2017)

Pasar global yang terus berkembang di antaranya seperti contoh di bawah dan tidak terbatas ini (Bezdek, 2021) :

1. Iradiasi makanan (Food irradiation) terus berkembang dengan *Compounded annual growth rate* (CAGR) atau tingkat pertumbuhan per tahun sekitar 5%. (Pasar Global \$250 million)
2. Peralatan Radiasi Pengion (*Ionizing-radiation equipment*) dengan pertumbuhan CAGR of 5% (\$40 billion )
3. *Magnetic resonance imaging* (MRI)-guided untuk sistem terapi radiasi dengan CAGR lebih dari 20%. (\$300 million)
4. Pasar *Medical X-ray Radiation Protection Glass* dengan pertumbuhan CAGR mendekati 2% (\$350 million)
5. Pasar obat-obatan dan Radio-farmasi (*Medicine and radiopharmaceuticals*) berkembang dengan CAGR 9%. (\$6 billion )
6. Produk pengobatan dan penyembuhan lewat radiasi tumbuh dengan CAGR mendekati 7%. (\$8.5 billion )



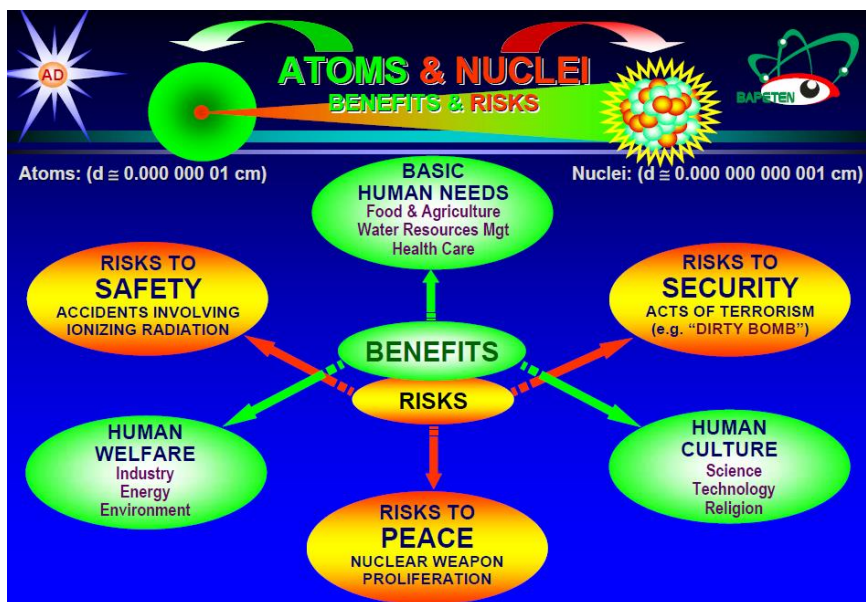
**Gambar 40** Aplikasi Nuklir Non-Energi: Radiasi Pengion (Bezdek, 2021)

7. Deteksi radiasi, *monitoring*, dan keselamatan (*Radiation detection, monitoring, and safety*) dengan CAGR lebih besar dari 4%. (\$30 billion)
8. Manajemen Dosis Radiasi (*Radiation Dose Management*) tumbuh dengan CAGR di atas 14%. (\$250 million )
9. Penguatan alat elektronika dengan radiasi (*Radiation-hardened electronics*) tumbuh dengan CAGR di atas 4%. (\$700 million )
10. Aplikasi Keselamatan Radiasi, Prototeksi dan Pelindung (*Radiation safety and protection and shielding applications*) tumbuh dengan CAGR lebih tinggi dari 4%. (\$60 million)
11. Radio-farmasi dan terapi (*Radiopharmaceutical and therapeutics*) dengan CAGR lebih dari 9%. (\$17 billion)
12. Terapi Radiasi (*Radiation therapy*) dengan CAGR mendekati 7%. (\$7 billion )

13. Peralatan dan sistem Radiasi Terahertz (*Terahertz radiation devices and systems*) dengan CAGR lebih dari 31%. (\$170 million)

### 3.2 Evaluasi Aspek Non-Proliferasi Nuklir

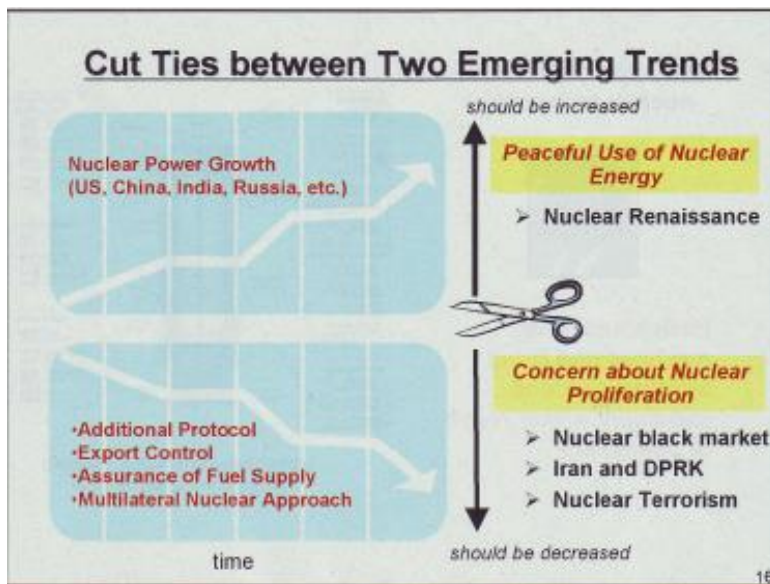
Setiap teknologi mempunyai manfaat yang akan kita terima dan juga dalam waktu yang bersamaan akan muncul tantangan yang inheren didalam system teknologi tersebut yang hadir dan memunculkan risiko yang akan di hadapi dalam memilih teknologi yang akan di ambil. Manfaat dan risiko seperti dua koin mata uang yang akan senantiasa hadir, yang pada akhirnya perlunya sebuah optimalisasi dengan memaksimalkan manfaat yang diraih dan meminimasi risiko yang akan muncul. Seperti di gambarkan dalam **Gambar 41**, yang senantiasa memunculkan manfaat dan risiko penggunaan energi nuklir. Salah satu risiko yang akan muncul adalah terkait permasalahan nuklir non-prolifikasi yang berhubungan erat dengan risiko terorisme, pemnfaatan bahan bakar nuklir untuk bahan senjata dan lain sebagainya. Harus ada upaya di mana semua aktivitas pemanfaatan teknologi nuklir hanya dan untuk tujuan damai dan digunakan untuk keperluan sipil baik listrik, kesehatan, pertanian, industri dan lain sebagainya.



Sumber : BAPETEN, 2005, ITB-TIT COE-JNES Symposium on Nuclear Energy in Indonesia, 2005.

**Gambar 41** Manfaat dan risiko pemanfaatan energi nuklir (BAPETEN, 2005).

Upaya terus menerus dilakukan dalam beberapa dekade saat ini, untuk meningkatkan optimalisasi penggunaan bahan bakar nuklir, mengurangi dan menstabilkan sampah bahan bakar bekas nuklir secara efektif dan menghambat dan mengurangi risiko dari aspek proliferasi bahan-bahan nuklir. Terkait topik nuklir proliferasi, saat ini menjadi topik yang hangat terutama semenjak diterbitkannya proposal presiden Amerika Serikat (AS) Obama dalam rangka mengurangi senjata nuklir dan memperkuat keamanan nuklir dan nuklir non-proliferasi di dunia (whitehouse.gov, 2009). Produksi dan manajemen penggunaan, transportasi sampai pada penanganan bahan bakar bekas material nuklir secara intensif diawasi, jaga dan dimonitor oleh IAEA (*International Atomic Energy Agency*) untuk mengurangi potensi risiko pemanfaatan bahan bakar nuklir bukan untuk tujuan damai termasuk didalamnya untuk bahan bakar bekas reaktor komersial. Hal itu disebabkan, karena adanya indikasi atau potensi bahan bakar bekas dari reaktor sipil atau komersial digunakan untuk produksi senjata nuklir. Bagaimana untuk menekan penggunaan material nuklir untuk tujuan senjata, perag dan terorisme, dan memperkuat pemanfaatan material dan teknologi nuklir untuk tujuan damai dan kesejahteraan dunia sebagaimana di jelaskan dalam **Gambar 42**.



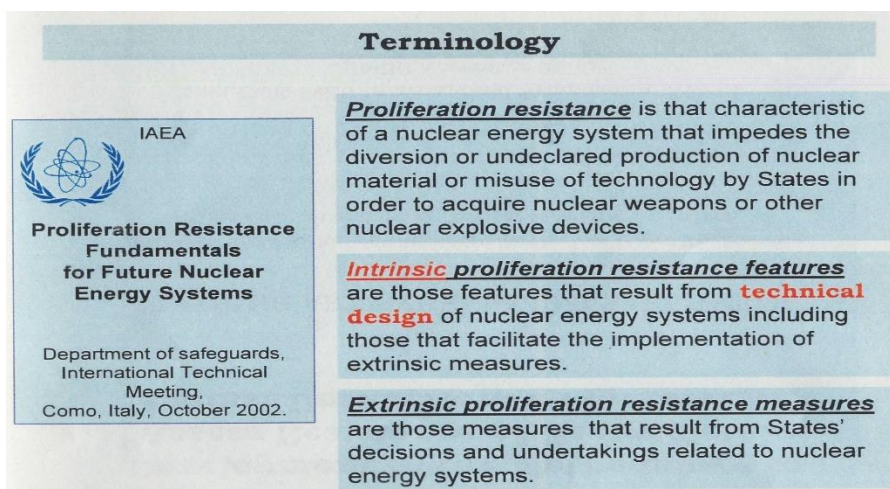
Sumber: Vladimir Artisyuk and Masaki Saito, COE-INES International Symposium INES-2 Nov. 26-30, 2006

**Gambar 42** Target energi nuklir untuk tujuan damai (Artisyuk V and M. Saito, 2006)

### 3.3.1 Definisi dan Ruang Lingkup Non-prolifikasi Nuklir

Berbagai evaluasi dan penelitian telah dilakukan dalam rangka mengevaluasi hal-hal terkait energi nuklir dan berbagai permasalahan terutama terkait nuklir non-proliferasi, terutama di antaranya hal-hal di bawah ini sebagai latar belakang pentingnya analisis nuklir non-prolifikasi:

1. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan penggunaan energi nuklir baik mengadopsi teknologi *reactor konvensional* yang sudah komersial maupun reaktor generasi masa depan.
2. Peningkatan penggunaan energi nuklir baik untuk aplikasi daya maupun kesehatan, kedokteran dan aplikasi industri lainnya, memerlukan manajemen bahan bakar nuklir yang selain potensi digunakannya untuk tujuan damai, akan tetapi ada potensi dipergunakan untuk tujuan militer atau pembuatan senjata
3. Diperlukan metode atau evaluasi khusus terkait faktor proliferasi bahan nuklir baik untuk penggunaan reaktor daya ataupun riset untuk intrinsik tipe reaktor thermal dan pembiak cepat maupun berbagai fasilitas berkaitan dengan bahan bakar nuklir. Dan diperlukan metode yang efektif mengurangi level proliferasinya agar potensi pemanfaatan bahan nuklir tidak digunakan untuk tujuan senjata.



Gambar 43 Terminologi terkait aspek non-proliferasi nuklir(Artisyuk V and M. Saito, 2006).

Secara definisi non-prolifikasi nuklir atau proliferasi *resistance* mengacu pada IAEA adalah karakteristik sistem energi nuklir yang menghambat atau menghalangi proses pengalihan atau tidak diumumkannya produksi material

nuklir atau penyalahgunaan teknologi oleh negara dalam rangka mendapatkan senjata nuklir atau alat peledak nuklir lainnya. *Proliferation resistance* (PR) dibagi dalam dua aspek, yaitu aspek proliferasi intrinsik dan aspek proliferasi ekstrinsik. Proliferasi intrinsik lebih mengacu pada desain teknis dari sistem energi nuklir termasuk memfasilitasi implementasi dari tindakan ekstrinsik. Aspek ekstrinsik menekankan pada negara yang menghasilkan keputusan atau kebijakan yang terkait dengan sistem energi nuklir. Dengan kata lain aspek organisasi negara ekstrinsik dan aspek teknologi dan teknis terkait pemanfaatan material nuklir yang menjadi perhatian proliferasi intrinsik, sebagaimana dijelaskan pada **Gambar 46**.

### 3.3.2 Komposisi dan Karakteristik Material pada Non-prolifikasi Nuklir

Komposisi material tersebut berasal beberapa parameter seperti kualitas material nuklir yang digunakan, hal ini terkait dengan halangan atau hambatan teknis dan teknologi beserta pengaturan secara institusi atau organisasi yang secara umum kita sebut *barrier*. *Barrier* atau penghalang ini yang membuat pelaku proliferasi kesulitan memanfaatkan sistem energi nuklir sipil disalahgunakan. Material penghalang atau *barrier* di antaranya komposisi isotop material nuklir termasuk persentase dan tipenya. Kemudian pemanfaatan teknologi pemrosesan kimia untuk pemisahan bahan yang dapat dijadikan senjata nuklir. Selain itu ada bahaya radiasi dan jejaknya yang dikaitkan dengan tahapan proses yang menghasilkan material yang dapat dimanfaatkan untuk senjata. *Barrier* kelima adalah situasi yang bisa membuat sulit untuk memindahkan material nuklir dalam jumlah signifikan, serta terakhir adalah kemampuan melekat mendeteksi material nuklir. Aspek penghalang atau *barrier* material nuklir yang digunakan secara umum untuk evaluasi awal adalah isotopic *barrier* atau penghalang isotop yang berkaitan dengan massa kritis, produksi neutron spontan (*Spontaneous neutron generation or fission* (SNF)) dan laju produksi panas peluruhan atau *decay heat rate* (DH), kemudian level radiasi nuklir dan lainnya sebagaimana dijelaskan pada **Gambar 47**. Salah satu cara untuk menjaga material tersebut dari pemanfaatan senjata nuklir yang berkaitan dengan properti intrinsik plutonium adalah dengan meningkatkan kadar material penghalang atau material *barrier* isotop plutonium tersebut, terutama dengan meningkatkan komposisi dari isotop plutonium bernomor masa genap (Pu-238, Pu-240 dan

Pu-242 (Kessler, 2007; Pellaud, 2002; Saito, 2002)( IAEA, 1972). Pendekatan ini dipilih berdasarkan dari tingginya intensitas *decay heat* (DH) dan *spontaneous fission neutron* (SFN) isotop-isotop plutonium tersebut yang telah digunakan sebagai sebuah parameter untuk meningkatkan level nuklir non-proliferasi pada plutonium.

**Terminology**

US  
Department of Energy  
Nuclear Energy  
Research Advisory  
Committee

**Technological  
Opportunities To  
Increase  
The Proliferation  
Resistance Of Global  
Civilian Nuclear Power  
Systems**

January 2001

**Material qualities, technical impediments and institutional arrangements** present **barriers** that make it difficult for proliferators to exploit civilian nuclear power systems.

**Material barriers** include

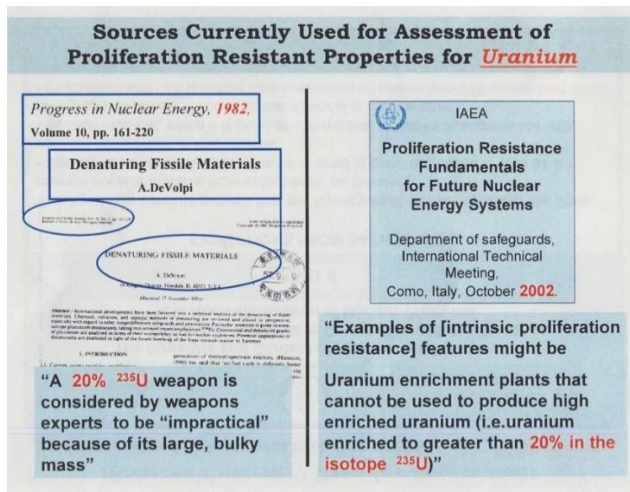
- the **isotopic composition** (percentage and type),
- the chemical processing required to separate a weapons-usable substance,
- the radiation hazard and signature associated with the material at each step in the civilian system and in any process to generate a weapons-usable material,
- the difficulty of moving the mass/or bulk of the material,
- the inherent detectability of the material.

**"Isotopic barrier"** incorporates issues and attributes including critical mass, spontaneous neutron generation and heat generation rate, radiation and so on.

**Gambar 44** Terminologi Terkait Kualitas dan penghalang (barrier) material nuklir(Artisyuk V and M. Saito, 2006)

Komposisi material tersebut contohnya berasal dari komposisi plutonium yang dapat diproduksi dari LWR maupun reaktor cepat atau *fast reactor* (FR). Penggunaan pengayaan uranium 235 yang sangat tinggi atau disebut *highly enriched uranium*, Plutonium dan bahan trans-uranium lainnya yang mempunyai potensi menjadi bahan bakar untuk senjata nuklir perlu diminimasi potensi penggunaannya dengan meningkatkan berbagai cara di antaranya dengan peningkatan material barrier atau penghalang bahan. Daur ulang uranium dan plutonium menjadi alternatif yang menguntungkan baik secara keberlanjutan pemanfaatan bahan bakar nuklir maupun mengurangi volume sampah radioaktif yang ada. Untuk kasus plutonium, kualitas bahan bakar akan bergantung pada fisil plutonium seperti Pu-239. Hal ini dapat dilihat dari tingginya faktor pelipatgandaan neutron atau tingkat kekritisan dan juga kemampuan dari pembiakan bahan bakar. Pada saat yang sama, Pu-239 mempunyai kualitas yang baik untuk dipakai sebagai bahan senjata nuklir.



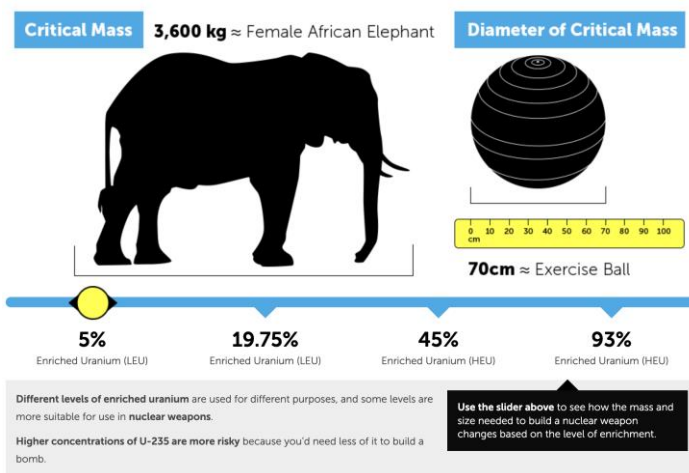


**Gambar 45** Evaluasi Karakteristik *Proliferation Resistance* (PR) Untuk Uranium (Artisyuk V and M. Saito, 2006)

Seperti dijelaskan sebelumnya material nuklir mempunyai karakteristik masing-masing yang berbeda-beda sehingga karakteristik penghalang pun berbeda-beda. Materil nuklir yang sensitif dan menjadi perhatian aspek non-proliferasi nuklir adalah Material Uranium. Uranium secara alami ada di sekitar kita dengan komposisi yang bervariasi dari yang level normal alami maupun konsentrasi yang tinggi. Secara alamiah, Uranium mempunyai tiga isotop, yaitu isotop uranium U-234, U-235 dan U-238. Konsentrasi terbanyak sekitar 99,3 % adalah U-238, sedangkan U-235 konsentrasi rendah 0,7% dan lebih kecil lagi U-234. IAEA mendefinisikan komposisi U-235 sebagai parameter sensitif dan biasa disebut dengan *enrichment* atau pengayaan. Komposisi pengayaan U-235 dibatasi untuk penggunaan sipil atau reaktor daya dan eksperimen maksimum 20% pengayaan U-235, atau yang disebut *low enriched uranium* (LEU) atau uranium pengayaan rendah. Pengayaan U-235 di atas 20% menjadi hal sensitif dengan definisi *highly enriched uranium* (HEU) dan untuk *highly enriched uranium weapon grade* (HEU-WG) adalah pengayaan U-235 > 90% yang biasa digunakan untuk senjata nuklir. Sebagaimana di gambarkan di **Gambar 48**, 20% U-235 menjadi parameter pembatas karena aspek *barrier* proliferasinya terkait dengan massa kritis atau *critical mass* yang sangat besar sehingga secara praktis tidak bisa digunakan untuk hulu ledak nuklir.

Apalagi kalau pengayaan U-235 lebih kecil dari 20% akan semakin berat *critical mass*-nya, seperti contoh untuk reaktor komersial saat ini

menggunakan pengayaan U-235 3-5 % untuk jenis *light water reactor* (LWR) dan *natural uranium* dengan U-235 0,7% untuk reaktor CANDU, maka berat massa kritisnya akan sangat besar sekali. Sehingga secara praktis tidak bisa digunakan. Semakin besar pengayaan U-235 semakin kecil massa kritisnya untuk menjadikan bahan nuklir itu melakukan reaksi berantai secara berkesinambungan dan bisa tak terkendali. **Gambar 46** menggambarkan ilustrasi komposisi pengayaan U-235 dengan massa kritis yang diperlukan untuk terjadinya reaksi berantai dalam sistem senjata nuklir.



**Gambar 46** Massa kritis untuk berbagai pengayaan uranium

**Sources Currently Used for Assessment of Proliferation Resistant Properties for *Plutonium***

IAEA Information Circular  
(Unofficial electronic edition)

INFCIRC/153 (Corrected)  
June 1972 GENERAL Distr.  
Original: ENGLISH

The Structure and Content of Agreements Between the Agency and States Required in Connection with the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons

PART II

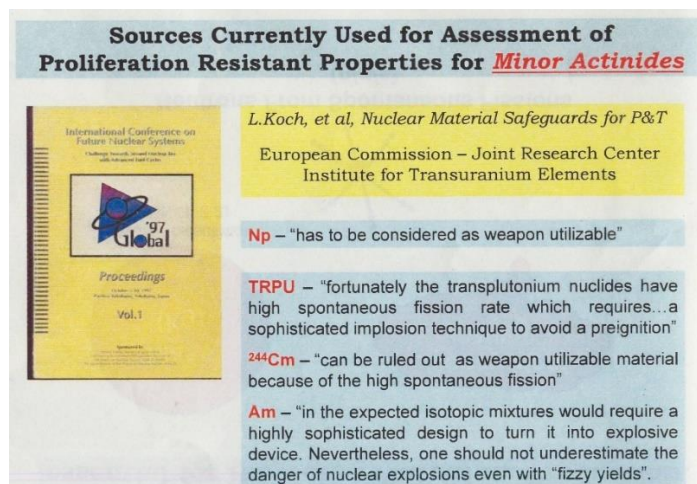
EXEMPTIONS FROM SAFEGUARDS

The Agreement should provide that the Agency shall, at the request of the State, exempt *nuclear material* from safeguards, as follows:

- Special fissionable material, when it is used in gram quantities or less as a sensing component in instruments;
- *nuclear material*, when it is used in non-nuclear activities in accordance with paragraph 13 above, if such nuclear material is recoverable;
- **Plutonium with an isotopic concentration of plutonium-238 exceeding 80%.**

**Gambar 50** Evaluasi karakteristik *Proliferation Resistance* (PR) untuk Plutonium (Artisuyuk V and M. Saito, 2006)

Plutonium secara umum tidak ada di alam, kecuali karena proses reaksi nuklir sehingga terbentuk melalui mekanisme perubahan inti atom dari U-238 yang menangkap neutron menjadi U-239, kemudian meluruh menjadi Neptunium-239 (Np-239) dengan menghasilkan beta dan meluruh sekali lagi dengan mengeluarkan beta menjadi Pu-239 yang menjadi salah satu isotop plutonium dengan nomor atom 94. Rantai plutonium secara umum terdiri atas isotop plutonium Pu-238 sampai Pu-242 dengan masing-masing bernomor masa genap dapat dikatakan sebagai *material fertile* di antaranya Pu-238 dan Pu-240, sedangkan Pu-242 masih belum dapat dikatakan *fertile* tetapi masih dalam golongan plutonium bermasa genap. Sedangkan plutonium bermasa ganjil disebut sebagai material fisil seperti Pu-239 dan Pu-241 yang komposisinya menentukan kuantitas bahan material yang dapat berfisi dan juga penentu komposisi *significant quantity*. Komposisi plutonium akan banyak dipengaruhi oleh mekanisme daur ulang rantai disekelilingnya. Dapat berubah karena pengaruh produksi dari rantai uranium atau juga berubah akibat kontribusi dari rantai plutonium sendiri begitu juga dapat berubah dari kontribusi rantai aktinida minor (MA) terutama dari pengaruh konversi neptunium melalui peluruhan beta maupun americium melalui peluruhan alfa. Terkait komposisi plutonium, semua komposisi isotop plutonium akan menjadi akan selalu diawasi dan menjadi perhatian pengawasan nuklir, kecuali apabila komposisi material plutonium yang mempunyai konsentrasi Pu-238 lebih dari 80% sebagaimana dijelaskan dalam **Gambar 50**.



**Gambar 47** Evaluasi karakteristik *Proliferation Resistance* (PR) untuk Aktinida Minor (Artisyuk V and M. Saito, 2006)

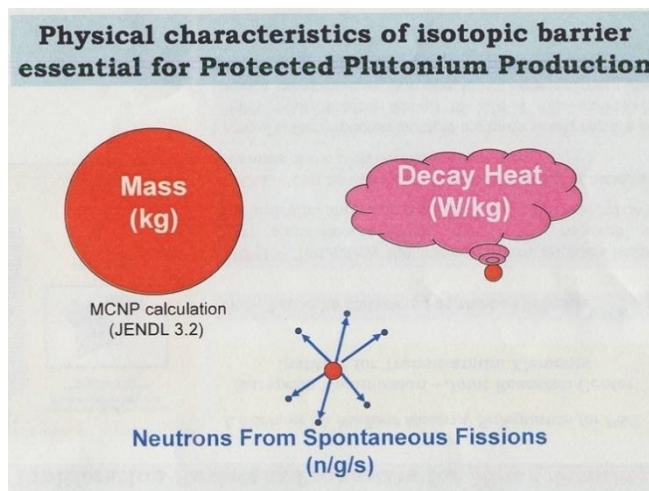
Selain komposisi umum sebagai bahan bakar nuklir yang banyak digunakan seperti Uranium dan Plutonium, juga ada beberapa material nuklir yang masuk kategori aktinida minor atau material nuklir bermasa berat dan lebih berat dari uranium yang komposisinya elatif sedikit dibanding uranium dan plutonium. Material nuklir sebagai aktinida minor yang masuk perhatian pengawasan nuklir, yaitu Neptunium (Np) yang terdiri isotop Np-237 dan Np-239, kemudian TRPU atau trans Plutonium, yaitu aktinida berupa Americium (Am) dan Curium (Cm), kemudian isotop Cm-244 dan aktinida Americium (Am). Material aktinida minor tersebut termasuk dalam kategori kalau digunakan untuk senjata dimungkinkan untuk dibuat, kemudian mempunyai jumlah laju produksi fisi spontan dengan teknik yang cocok untuk menghindari preignisi atau triger fisi awal. Dan Cm-244 karena SFN-nya sangat tinggi atau laju produksi fisi spontan tinggi maka bisa dikeluarkan dari jenis material yang mungkin berpotensi dibuat menjadi senjata sebagaimana dijelaskan dalam **Gambar 51**.

### **3.3 Proteksi Proliferasi Plutonium dan Metodologi Material Attractiveness**

Berbagai upaya dalam rangka meningkatkan penggunaan bahan bakar nuklir secara optimal, meminimalkan sampah bahan bakar nuklir secara efektif dan mengurangi risiko dari proliferasi bahan nuklir telah dilakukan dalam beberapa dekade saat ini. Seperti yang disebutkan pada bagian sebelumnya, bahwa isu-isu berkaitan dengan nuklir non-proliferasi semakin hangat terutama semenjak diterbitkannya proposal Presiden Amerika Serikat Obama dalam rangka mengurangi senjata nuklir dan memperkuat keamanan nuklir dan nuklir non-proliferasi di dunia (whitehouse.gov, 2009). Produksi material nuklir secara intensif dijaga dan dimonitor oleh *International Atomic Energy Agency* (IAEA) dengan harapan untuk mengurangi potensi risiko pemanfaatan bahan bakar nuklir bukan untuk tujuan damai karena adanya indikasi atau potensi penggunaan bahan bakar bekas dari reaktor sipil untuk produksi senjata nuklir. Komposisi material tersebut berasal dari komposisi plutonium yang dapat diproduksi dari reaktor berpendingin air ringan (*light water reactors* (LWR)) maupun reaktor cepat (*fast reactor* (FR)). Kualitas bahan bakar fisil plutonium seperti Pu-239 dapat dilihat dari tingginya faktor pelipatgandaan neutron atau tingkat kekritisitas dan juga kemampuan dari pembiakan bahan bakar. Pada saat yang sama, Pu-239 mempunyai kualitas

yang baik untuk dipakai sebagai bahan senjata nuklir. Berkaitan dengan hal tersebut, menjaga dan meningkatkan kapasitas Pu-239 untuk kritikalitas reaktor dan pembiakan bahan bakar harus dilakukan, akan tetapi pada saat yang bersamaan pula material tersebut harus dijaga agar jangan sampai digunakan untuk hal yang bukan tujuan damai.

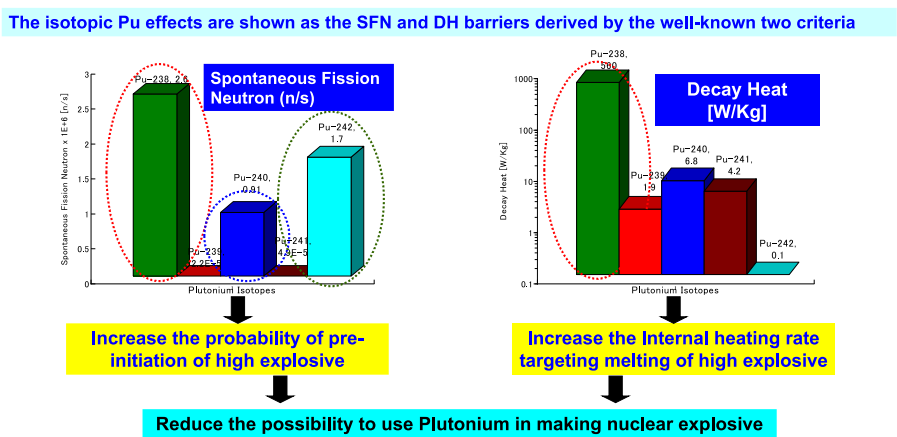
Ada dua tipe material dan cara pemanfaatan bahan bakar nuklir untuk dijadikan bahan bakar senjata. Material dan cara pemanfaatnya adalah uranium-235 (U-235) dengan cara pengayaan sampai di atas 95% dengan batas ambang masa kritisnya adalah sekitar 50 kg, dan bahan Pu-239 yang bisa diambil dari daur ulang bahan bakar bekas dengan batas masa kritisnya adalah 10 kg. Nilai batas masa signifikan untuk plutonium yang berpotensi digunakan untuk senjata nuklir adalah 8 kg menurut ketentuan IAEA (IAEA, 1972). Untuk reaktor sipil diharuskan pengayaan di bawah batas 20 % U-235 yang didefinisikan sebagai pengayaan uranium tingkat rendah (*low enriched uranium*). Di atas nilai itu sudah masuk kategori *high enriched Uranium* atau pengayaan uranium tingkat tinggi, meskipun untuk kategori pengayaan senjata di atas 90% U-235. Sebagaimana digambarkan pada **Gambar 52** untuk *barrier* isotop untuk proliferasi plutonium terdiri atas masa kritis (*Critical Mass*), panas peluruhan (*Decay Heat/DH*) dan level produksi netron fisi spontan (*Spontaneous Fission Neutron/SFN*).



Sumber: Vladimir Artisyuk and Masaki Saito, COE-INES International Symposium INES-2 Nov. 26-30, 2006

**Gambar 48** Karakteristik Fisik *Barrier* Isotop Untuk Produksi Proliferasi Plutonium (Artisyuk V and M. Saito, 2006)

Terkait komposisi plutonium yang dapat dipergunakan senjata nuklir berdasarkan komposisinya masih belum dijelaskan secara detail oleh IAEA kecuali untuk kadar komposisi Pu-238 di atas 80% dapat dikategorikan aman untuk tidak dilakukan inspeksi dari IAEA. Salah satu cara untuk menjaga material tersebut dari pemanfaatan senjata nuklir yang berkaitan dengan karakteristik melekat (*intrinsic property*) plutonium adalah dengan meningkatkan kadar material penghalang atau *material barrier* isotop plutonium tersebut, terutama dengan meningkatkan komposisi dari isotop plutonium bernomor massa genap (Pu-238, Pu-240 dan Pu-242) (Kessler, 2007; Pellaud, 2002; Saito, 2002).



**Gambar 49** Pengaruh Komposisi Plutonium Terhadap *Decay Heat* dan *Spontaneous Fission Neutron*

Pendekatan ini dipilih berdasarkan tingginya intensitas peluruhan panas atau *Decay Heat* (DH) dan neutron fisi spontan atau *Spontaneous Fission Neutron* (SFN) isotop-isotop plutonium tersebut yang telah digunakan sebagai sebuah parameter untuk meningkatkan level nonproliferasi nuklir pada bahan bakar plutonium. Kadar DH bisa digunakan untuk meningkatkan pemanasan internal yang menyebabkan bahan senjata tersebut mengalami pelelehan sebelum dibentuk jadi senjata seperti digambarkan pada **Gambar 53**. Sedangkan kadar SFN ditujukan untuk meningkatkan potensi ledakan initial dalam proses pembuatan senjata, sehingga pembentukan senjata tersebut menjadi lebih sulit.

Seperti telah disinggung dalam penjelasan di bagian sebelumnya bahwa parameter utama dalam mengevaluasi material penghalang plutonium ini adalah berdasarkan pada aktivitas *Decay Heat* (DH) dan komposisi dari

*Spontaneous Fission Neutron* (SFN). Komposisi-komposisi DH dan SFN bervariasi dan hal itu sensitif terhadap komposisi isotop plutonium khususnya terhadap komposisi isotop-isotop plutonium dengan nomor masa genap seperti Pu-238, Pu-240 dan Pu-242 (Permana & Suzuki, 2011). Komposisi DH dan SFN digunakan untuk menaikkan tingkat kesulitan secara teknis pembuatan senjata nuklir yang disebabkan oleh tingginya rasio pemanasan internal untuk melelehkan bahan senjata nuklir dan juga pre-initiation dari senjata ledak yang tinggi. Persamaan-persamaan yang dipakai untuk mengevaluasi komposisi DH dan SFN yang berdasar pada komposisi plutonium adalah sebagai berikut:

$$DH_{total} = \sum_{i=1}^n DH_i \times VecPu_i \quad (1)$$

$$SFN_{total} = \sum_{i=1}^n SFN_i \times VecPu_i \quad (2)$$

Total komposisi dari DH dan SFN didapat dari akumulasi komposisi kontribusi masing-masing isotop plutonium yang didapat dari persamaan (1) dan (2).

**Tabel 2.** Properti Material Isotop Plutonium (Pellaud, 2002)

Plutonium Isotopes	Decay Heat [W/kg]	Spontaneous Fission Neutron [n/s/kg]
Pu-238	560	2.6E+6
Pu-239	1.9	2.2E+1
Pu-240	6.8	9.1E+5
Pu-241	4.2	4.9E+1
Pu-242	0.1	1.7E+6

Komposisi-komposisi ini akan dievaluasi sebagai sebuah fungsi dari waktu. Fungsi waktu tersebut berdasarkan fungsi dari iradiasi atau *burn up* dan waktu peluruhan setelah bahan bakar itu dikeluarkan dari reaktor dengan menggunakan beberapa tipe pengayaan uranium (U-235) berdasar pada target beberapa nilai *burn up*. Kontribusi DH dan SFN dari setiap individu isotop plutonium berasal dari komposisi murni (komposisi 100%) masing-masing isotop plutonium berdasarkan **Tabel 2**.

Analisis *material attractiveness* akan dilakukan fokus pada komposisi isotop plutonium. Konsep *Attractiveness* (ATTR) (Saito et al., 2008) yang dikembangkan oleh Profesor Saito di Tokyo Institute of Technology, Jepang, diadopsi dalam rangka mengevaluasi level *material attractiveness* yang

berhubungan dengan beberapa parameter-parameter sensitif seperti komposisi-komposisi Alpha Rossi ( $\alpha$ ) dan DH dan SFN. Nilai significant quantity (SQ) untuk, berat 8 kg plutonium akan digunakan evaluasi Alpha Rossi ( $\alpha_{SQ}$ ) untuk tipe bahan bakar metal. Faktor kompresi untuk densitas plutonium diset 4 kali lebih tinggi dari keadaan densitas normal plutonium pada fase alpha. Persamaan untuk menggambarkan konsep ATTR digambarkan dalam persamaan (3) sampai (5). Sebagai komponen yang bergantung waktu, persamaan ATTR bergantung waktu akan mempunyai komponen t yang digambarkan pada persamaan 8. Alpha Rossi digunakan sebagai representasi dari potensi daya ledak yang tinggi akibat proses Kritikalitas sebuah bahan yang berhubungan dengan reaksi fisi pada bahan tersebut. Nilai kebergantungan waktu dimasukkan untuk mengetahui efek dari waktu operasional reaktor terhadap komposisi atau level *material attractiveness*.

Nilai-nilai Alpha Rossi, *Decay Heat* dan *Spontaneous Fission Neutron* akan dinormalisasi oleh masa tak hingga Pu-239 100% ( $\alpha_\infty$ ), DH dari Pu-238, ( $DH^8$ ) dan SFN Pu-238 ( $SFN^8$ ), berurutan. ATTR level akan dinormalisasikan oleh nilai ATTR 100% komposisi Pu-239 yang artinya nilai ATTR akan menjadi nilai rasio terhadap ATTR Pu-239. Alpha Rossi didefinisikan sebagai sebuah ratio dari nilai super-kritikalitas ( $k_{eff} - 1$ ) terhadap nilai rata-rata *neutron generation* atau *prompt neutron life time* ( $\tau$ ). Index-index dari n,p dan q diset menjadi nilai 1. Nilai index tersebut menggambarkan pengaruh dari densitas material yang berpengaruh kepada energi yang dikeluarkan (Mark et al., 2009). Untuk optimisasi evaluasi *material attractiveness* tersebut yang berkaitan dengan alpha rossi, digunakan sebuah kode komputer MCNP-4C (Briesmeister, 2000) dan Nuclear data library JENDL-3.3 (SHIBATA et al., 2002).

$$\alpha \equiv \frac{k_{eff} - 1}{\tau} \tag{3}$$

$$ATTR = \frac{\left(\frac{\alpha_{SQ}^i}{\alpha_\infty^9}\right)^n}{\left[\frac{DH^i}{DH^8}\right]^p + \left[\frac{SFN^i}{SFN^8}\right]^q} \tag{4}$$

$$ATTR(t) = \frac{\left(\frac{\alpha_{SQ}^i(t)}{\alpha_\infty^9}\right)^n}{\left[\frac{DH^i(t)}{DH^8}\right]^p + \left[\frac{SFN^i(t)}{SFN^8}\right]^q} \tag{5}$$



Evaluasi untuk *material attractiveness* kami bandingkan antara konsep ATTR (Saito et al., 2008) dengan konsep *Figure of merit* (FOM) (Bathke et al., 2008; 2009) untuk mengetahui persamaan dan perbedaan pendekatan kedua metodologi dalam mengevaluasi level non-prolifikasi bagi *material attractiveness*. Konsep FOM dapat dilihat dari beberapa persamaan di bawah ini yang terdiri atas dua jenis derivatif persamaan.

$$FOM_2 = 1 - \log_{10} \left( \frac{M}{800} + \frac{Mh}{4500} + \frac{MS}{6.8(10)^6} + \frac{M}{50} \left[ \frac{D}{500} \right]^{\frac{1}{\log_{10} 2}} \right) \quad (6)$$

$$FOM_2 = 1 - \log_{10} \left( \frac{M}{800} + \frac{Mh}{4500} + \frac{MS}{6.8(10)^6} + \frac{M}{50} \left[ \frac{D}{500} \right]^{\frac{1}{\log_{10} 2}} \right) \quad (7)$$

M: *Bare critical mass* (Kg)

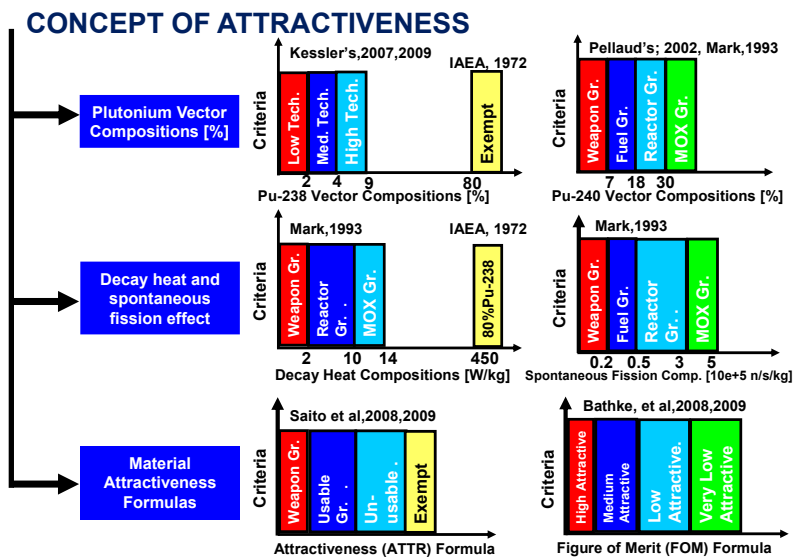
h: *Decay heat* (W/Kg)

D: *Dose rate* (rad/h)

S: *Spontaneous Neutron Source* (1/s)

Konsep FOM dikembangkan oleh Los Alamos National Laboratory (LANL) untuk mengevaluasi *attractiveness* campuran material yang berisi *Special Nuclear Materials* (SNM) (Bathke et al., 2008; 2009), yang terdiri atas dua konsep FOM yaitu FOM1 dan FOM2. Formula pertama yaitu FOM1 berdasarkan asumsi bahwa setiap *pre-initiation* tidak termasuk yang secara signifikan berpengaruh pada *material attractiveness*, oleh karenanya, dalam formula FOM1 pengaruh *pre-initiation* dari *Spontaneous Fission Neutron* (SFN) tidak dimasukkan (Bathke et al., 2008; 2009). Formula kedua yaitu FOM2, berdasarkan pada tambahan komponen analisis yang memasukan pengaruh *pre-initiation Spontaneous Fission Neutrons*, sehingga dapat berpengaruh dalam mengurangi level *material attractiveness* (Bathke et al., 2008; 2009). Seperti halnya ATTR, FOM juga mempunyai komponen dasar yang sama, yaitu terdiri atas beberapa komponen utama dan faktor normalisasi dari *Bare Critical Mass* (BCM), SFN, and DH. Nilai-nilai komponen FOM dinormalisasi berdasarkan nilai tertentu pada masing-masing jenis faktor di antaranya komponen BCM dinormalisasi oleh nilai sebuah BCM dari 20% pengayaan U-235 atau sekitar 800 kg, untuk komponen DH di normalisasi oleh sebuah nilai DH dari 80% komposisi Pu-238 dalam unit BCM dan untuk komponen SFN dinormalisasi

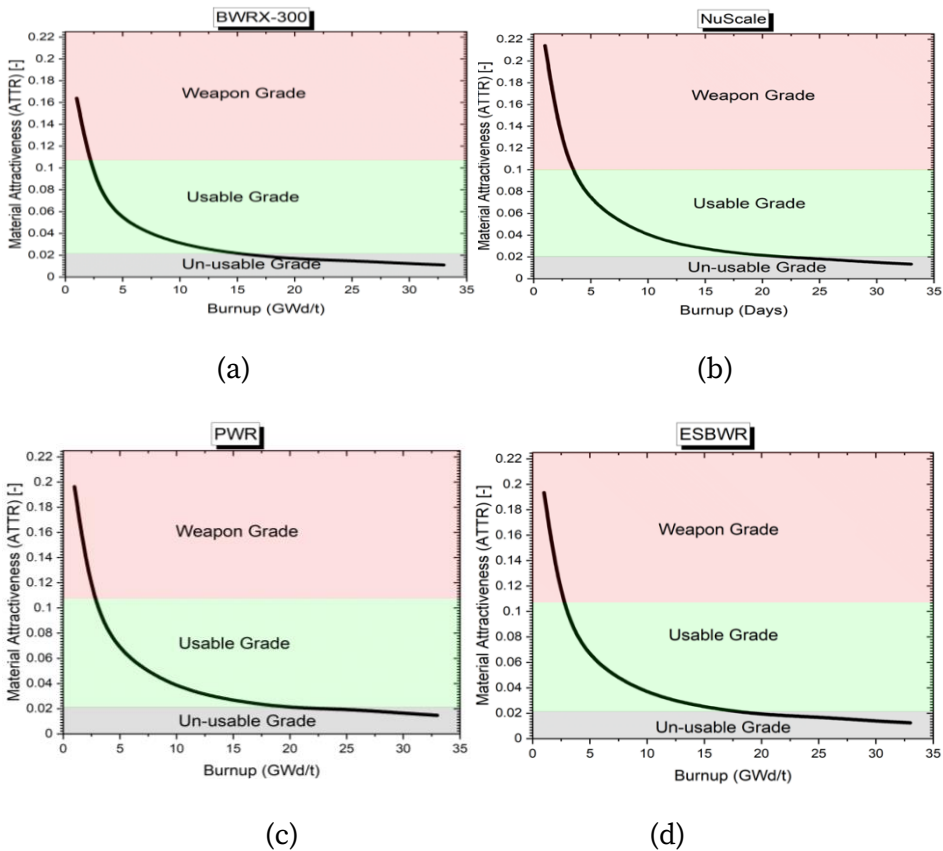
oleh nilai SFN dari komposisi bahan bakar berjenis MOX dalam satuan atau unit BCM.



Gambar 50 Skema analisis pendekatan *Material attractiveness*

Analisis *material attractiveness* secara pendekatan untuk mengevaluasi aspek intrinsik proliferasi nuklir dapat dilihat dengan beberapa skema pendekatan dan kategorisasi, seperti tampak pada **Gambar 54** yang menjelaskan skema pendekatan *material attractiveness*. Pendekatan pertama adalah melalui evaluasi komposisi isotop plutonium mengacu pada dua isotop plutonium bermasa genap yang menjadi proliferasi, yaitu komposisi Pu-238 dan Pu-240 (IAEA, 1972; Kessler, 2007; Mark et al., 2009; Pellaud, 2002). Kategorisasi komposisi isotop Pu-238 terdiri atas *low technology barrier*, *medium* sampai ke *high technology* pembuatan senjata dan kategori IAEA untuk Pu-238 lebih dari 80% yang termasuk kategori *exempt* atau tidak perlu diawasi sebagai material Pu yang sensitif karena level *Decay Heat* yang sangat tinggi. Berdasarkan kriteria komposisi isotop Pu-240, terdiri atas level *weapon grade* atau level komposisi senjata, *fuel grade* atau level untuk bahan bakar nuklir, *reactor grade* atau level bahan bakar reaktor nuklir dan terakhir MOX *mixed Uranium and Plutonium grade* atau level bahan bakar reaktor jenis MOX. Warna menggambarkan level semakin *attractive* artinya mudah untuk dijadikan senjata atau teknologi *barrier*-nya rendah (*low technology barrier*). *Fuel grade* menggambarkan komposisi tidak masuk senjata tapi masuk kategori bahan bakar di fasilitas nuklir, kemudian untuk reaktor sipil dan tipe

bahan bakar MOX. Untuk tipe bahan bakar MOX karena selain ada uranium tercampur plutonium didalamnya, maka proliferasinya semakin tinggi artinya level *attractiveness*nya menjadi rendah.



**Gambar 55** Material Attractiveness Selama Reaktor Beroperasi A) ESBWR, B) PWR C) BWRX-300, D) NuScale

Perhitungan *material attractiveness* atau daya tarik material mempertimbangkan nilai vektor komposisi isotop plutonium. **Gambar 55** menunjukkan nilai daya tarik material pada reaktor ESBWR, PWR, BWRX-300, NuScale, nilai tersebut sangat penting dalam meninjau kapan reaktor tersebut dikategorikan sebagai teknologi senjata nuklir. Keempat reaktor pada awal iradiasi berada pada level *material attractiveness* senjata pada saat reaktor mulai beroperasi (awal siklus/BOC). NuScale saat mencapai *burn up* sebesar 1 GWd/t memiliki nilai *material attractiveness* (ATTR), yaitu 0,21. Jika dibandingkan nilai ATTR antara kedua reaktor besar (ESBWR dan PWR) tidak terdapat perbedaan yang signifikan masing-masing sebesar 0,19 dan 0,20, hal

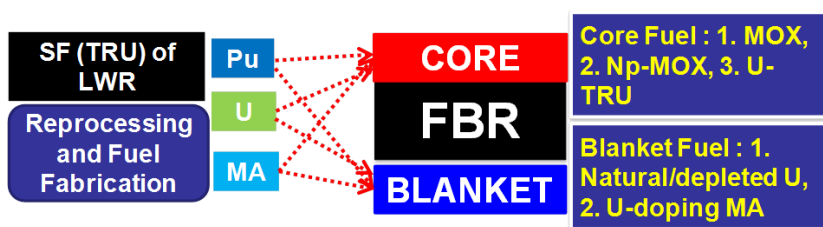
ini dikarenakan nilai pengayaan uranium 235 berada pada level yang sama, hal ini juga dipengaruhi oleh nilai ATTR. komposisi isotop plutonium yang dihasilkan. Namun jika dibandingkan antara reaktor kecil (BWRX-300 dan NuScale) terdapat perbedaan yang sangat signifikan, yaitu nilai ATTR keduanya sebesar 0,16 dan 0,21, hal ini dikarenakan pengayaan uranium U-235 pada reaktor BWRX-300 sebesar 3,4 % dan untuk NuScale sebesar 4,95% sehingga produksi isotop plutonium pada bahan bakar NuScale lebih besar dibandingkan pada bahan bakar BWRX-300. Antara ESBWR dan BWRX-300 terdapat perbedaan yang signifikan, hal ini dikarenakan pengayaan uranium U-235 juga berbeda, ESBWR diperkaya sebesar 4,2% dan BWRX-300 diperkaya sebesar 3,4%, oleh karena itu untuk BWRX-300 di awal pembakaran nilai ATTR hanya berada pada kisaran 0,17 berbeda dengan ESBWR nilai ATTR berada pada 0,19.

Pada grafik terlihat bahwa fase *grade* senjata dimulai dari awal pengoperasian reaktor hingga kurang lebih 100 hari waktu pembakaran, sedangkan untuk fase *usable grade* terjadi sebelum 800 hari, dapat diketahui juga bahwa *burn up* efektif menurunkan ATTR. nilai. Namun pada operasi *End of Cycle* (EOC) di mana reaktor telah mencapai burnup sebesar 33 GWd/t, bahan bakar pada keempat reaktor berada pada fase *un-usable grade*, untuk ESBWR memerlukan waktu 1319 hari untuk mencapai EOC sehingga mengakibatkan Nilai ATTR sebesar 0.0125, PWR memerlukan waktu 974 hari untuk mencapai EOC sehingga menghasilkan nilai ATTR sebesar 0.015, BWRX-300 memerlukan waktu 1421 hari untuk mencapai EOC sehingga menghasilkan nilai ATTR sebesar 0.011, dan NuScale memerlukan waktu 2086 hari untuk mencapai EOC sehingga menghasilkan nilai ATTR sebesar 0,013.

### **3.4 Fisika Reaktor dan Desain Teras Reaktor Nuklir**

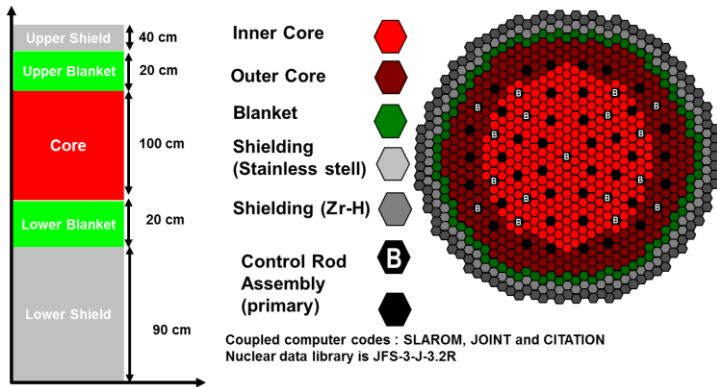
Pada umumnya reaktor nuklir terbagi menjadi dua tipe secara umum yang dibedakan dari pemanfaatan energi neutron, yaitu tipe reaktor termal yang umumnya menggunakan pendingin air di antaranya *light water reactor* (LWR), yang memanfaatkan generasi neutron dengan energi rendah atau laju gerak lambat untuk terjadinya reaksi fisi di dalam reaktor. Kemudian tipe kedua adalah tipe reaktor cepat yang umumnya menggunakan pendingin logam cair di antaranya *fast breeder reactor* (FBR), yang menggunakan neutron energi tinggi atau kecepatan tinggi untuk menghasilkan reaksi fisi di dalam reaktor.

Teknologi reaktor-reaktor tersebut menjadi basis untuk pengembangan reaktor lainnya sebagai *advanced nuclear reactor* atau lebih jauh menjadi generasi reaktor ke-IV. Beberapa nilai iradiasi atau *burn up* untuk tipe reaktor yang berbeda akan dilakukan dan diikuti oleh variasi waktu peluruhan berdasar pada proses waktu pendinginan setelah bahan bakar dikeluarkan dari reaktor. Sebagai salah satu contoh evaluasi fisika reaktor dan desain teras reaktor untuk tipe FBR, evaluasi dan perhitungan komposisi bahan bakar, estimasi kritikalitas infinit serta estimasi *burnup* dan parameter netronik dalam penelitian ini akan menggunakan komputer kode ORIGEN (Ludwig & Croff, 2002) dengan mengacu pada data pustaka nuklir JENDL/ENDF yang sudah masuk dalam paket kode komputer tersebut. Perhitungan di atas seperti tampak pada **Gambar 56**, digunakan untuk menghasilkan beberapa komposisi bahan bakar dari reaktor *light water reactor* (LWR) yang akan digunakan oleh reaktor FBR.



**Gambar 51** Alur analisis bahan bakar nuklir LWR yang digunakan untuk *Fast Breeder Reactor* (FBR)

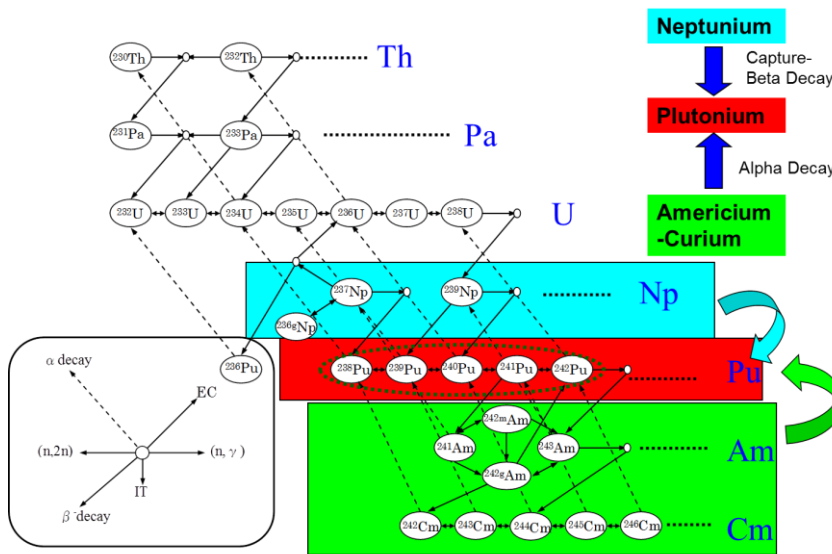
**Gambar 56** sebagai ilustrasi pemanfaatan multi-daur ulang berbasis uranium, memperlihatkan diagram alur bahan bakar bekas dari LWR yang akan digunakan oleh reaktor FBR setelah melalui proses *reprocessing* dan *fuel fabrication*. Proses yang sama dapat digunakan untuk bahan bakar berbasis thorium, dengan memanfaatkan thorium sebagai basis bahan bakar di campurkan dengan bahan bakar bekas dari LWR atau pengayaan uranium. Analisis teras reaktor keseluruhan dengan kebergantungan waktu dan ruang dapat diamati. Analisis deain reaktor dapat bervariasi di antaranya reaktor berjenis thermal seperti LWR dan MSR atau *molten salt reactor* dan juga berjenis *fast reactor* sehingga dapat dibandingkan efektivitas daur ulang bahan bakar nuklir terkait dengan tipe reaktor yang berbeda.



**Gambar 52** Desain Teras Reaktor Nuklir reaktor cepat berbahan bakar padat

Seperti dalam ilustrasi gambar reaktor berjenis FBR terdapat dua jenis bagian bahan bakar yang berbeda dari komposisi bahan bakar dan fungsinya. Bagian teras aktif FBR tersebut adalah bagian *core* atau *driver fuel* sebagai pengontrol operasional reaktor dan bagian *blanket* atau *breeding region* (pemiakan) yang berfungsi untuk memproduksi material fisi yang dapat dipakai untuk bahan bakar berikutnya. Evaluasi dan optimisasi desain reaktor FBR akan dilakukan dengan mengadopsi gabungan beberapa kode komputer di antaranya kode komputer CITATION, JOINT-FR, SLAROM dengan JENDL 3.2 versi revisi untuk *nuclear data library* (T. B. Fowler, et al, 1971; M. Nakagawa, K. Tsuchihashi, 1984; G. Chiba et al., 2002; T. Nakagawa et al.,1995), dengan desain tipe FBR yang digunakan mengacu pada jenis desain FBR yang dipublikasikan oleh Jepang, yaitu *Japan Sodium Fast Reactor* (JSFR) (S. Ohki, et al., 2008) seperti tampak pada **Gambar 57**.

Simulasi komputer yang digunakan adalah dalam rangka menginvestigasi komposisi bahan bakar nuklir pada proses reaksi berantai masing-masing bahan bakar terhadap waktu baik pada saat proses iradiasi di reaktor maupun saat terjadinya proses waktu pendinginan setelah bahan bakar tersebut dikeluarkan dari reaktor. Komposisi bahan bakar khususnya komposisi plutonium baik dalam jenis reaktor termal dan reaktor cepat baik komposisi awal maupun komposisi akhir setelah proses operasi reaktor akan dianalisis dan dikategorisasikan berdasarkan beberapa kategori komposisi plutonium (Mark et al., 2009; Pellaud, 2002; Permana et al., 2011). Untuk teras reaktor secara keseluruhan, kita memfokuskan pada tipe reaktor *fast breeder reactor* (FBR).



Gambar 53 Mekanisme rantai daur ulang bahan bakar nuklir

### 3.5 Daur Ulang Bahan Bakar Nuklir

Bahan bakar nuklir dapat digunakan sebagai bahan bakar PLTN bergantung pada mekanisme rantai perubahan aktinida nuklir dari mulai rantai thorium sampai pada rantai curium atau aktinida minor atau *minor actinide* (MA) seperti yang dijelaskan pada **Gambar 58**. Secara umum dan telah digunakan secara komersial, rantai nuklir uranium telah banyak digunakan karena secara alamiah mempunyai material fisil dari isotop U-235 yang sudah ada di alam, sedangkan rantai thorium mempunyai komposisi 100% Th-232 di alam. Akan tetapi Th-232 merupakan material *fertile* yang dia tidak dapat berfisi sampai dia berubah menjadi inti U-233 menjadi material fisil. Selain rantai uranium dan thorium yang ada secara alamiah, melalui proses reaksi didalam reaktor akan dihasilkan rantai plutonium dan juga rantai aktinida minor atau MA sebagaimana produksi isotop U-233 dari rantai thorium dihasilkan didalam reaksi nuklir.

Rantai plutonium secara umum terdiri atas isotop plutonium Pu-238 sampai Pu-242 dengan masing-masing bernomor masa genap dapat dikatakan sebagai material fertile di antaranya Pu-238 dan Pu-240, sedangkan Pu-242 masih belum dapat dikatakan fertile tetapi masih dalam golongan plutonium bermasa genap. Sedangkan plutonium bermasa ganjil disebut sebagai material fisil yang komposisinya menentukan kuantitas bahan material yang

dapat berfisi dan juga penentu komposisi *significant quantity*. Komposisi plutonium akan abanyak dipengaruhi oleh mekanisme daur ulang rantai disekelilingnya. Dapat berubah karena pengaruh produksi dari rantai uranium atau juga berubah akibat kontribusi dari rantai plutonium sendiri begitu juga dapat berubah dari kontribusi rantai aktinida minor (MA) terutama dari pengaruh konversi neptunium melalui peluruhan beta maupun americium melalui peluruhan alfa seperti tampak pada **Gambar 57**. Perubahan atau proses konversi bahan fertile berubah menjadi bahan bakar fisil disebut proses konversi dan kemampuan untuk berubah dapat disebut kapasitas rasio konversi atau conversion ratio dan apabila conversion ratio lebih dari 1 maka dapat disebut sebagai breeding rasio. Secara detail prose konversi dan fuel breeding ratio akan dijelaskan pada bagian berikutnya. Pada penelitian ini factor daur ulang thorium menjadi basis evaluasi dan pengaruhnya terhadap performansi reactor dan aspek sustainabilitas, keselamatan dan non-proliferasi nuklir akan di analisis.

### 3.6 Faktor Multiplikasi Neutron dan Reaktivitas Reaktor

Operasional sebuah reaktor nuklir secara mendasar akan mengacu pada faktor kritikalitas reaktor berdasar pada faktor multiplikasi dari populasi neutron yang diproduksi selama reaktor beroperasi didalam sebuah reaktor. Faktor multiplikasi juga akan berhubungan dengan reaktivitas reaktor selama operasi berlangsung. Stabilitas operasional reaktor akan bergantung pada reaktivitas berlebih dari faktor multiplikasi neutron dalam keadaan lebih kritis atau super kritis. Semakin kecil reaktivitas berlebihnya, akan semakin stabil reaktor beroperasi dan penanganan keselamatan semakin baik terutama pada saat awal reaktor beroperasi. Neutron yang dihasilkan berasal dari reaksi berantai nuklir dari hasil reaksi fisi bahan bakar nuklir. Faktor multiplikasi produksi neutron dapat dianalisis dengan pendekatan konsep k-eff sebagai keadaan kritikalitas efektif neutron dan k-inf sebagai keadaan kritikalitas reaktor tanpa memperhitungkan faktor bocoran neutron akibat faktor geometri.

$$k_{eff} \approx k_{inf} = \frac{\left( \sum_{i=1}^{i=n} \nu \Sigma_{fi} \right)}{\left( \sum_{i=1}^m \Sigma_{ai} \right)} \tag{8}$$



$\nu \Sigma_{fi}$  : *Macroscopic Production isotopes i (fuel materials)*  
 $\Sigma_{ai}$  : *Macroscopic Absorption isotopes i (all materials including coolant and structure)*

Produksi dan level populasi neutron bergantung pada faktor reaksi fisi dan produksi neutron serta faktor penyerapan oleh bahan bakar atau bahan nuklir. Hubungan persamaan k-eff dan k-inf diperlihatkan pada persamaan (8). Kontribusi masing-masing aktinida di dalam menentukan nilai faktor multiplikasi atau faktor kritikalitas reaktor sangat berpengaruh terutama aktinida termasuk di dalamnya isotop-isotop yang mempunyai nilai *microscopic fission cross-section* yang tinggi. Reaktivitas reaktor akan dilihat sebagai kelebihan neutron dibanding keadaan neutron ideal saat kritikalitas sama dengan 1, seperti dituliskan dalam persamaan (9).

$$\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}} \quad (9)$$

Nilai reaktivitas reaktor akan bergantung pada nilai kritikalitas sehingga kritikalitas berlebihnya dapat memberikan nilai reaktivitas. Apabila reaktivitas ideal pada saat nilai kritikalitas sama dengan 1 sehingga reaktivitas sama dengan nol. Apabila kritikalitas tinggi mengakibatkan reaktivitas akan semakin tinggi, sehingga semakin kecil atau mendekati nol, maka reaktor semakin baik. *Void reactivity coefficient* (VRC) yang merupakan salah satu indikator aspek keselamatan nuklir dalam operasionalnya. Kehilangan pendingin merupakan proses yang dapat saja terjadi meskipun sangat jarang dan beberapa desai reaktor tidak memperbolehkan adanya kehilangan pendingin baik karena mendidih maupun bocor. Pada saat pendingin hilang, keadaan kritikalitas harus dilihat, apakah semakin menurun yang artinya dengan sendirinya akan dengan sendirinya reaksi fisi berhenti atau justru reaktivitas semakin tinggi atau menjadi super-kritikalitas. Dengan metode ini kita bisa lihat gambaran umum, bagaimana keadaan reaktor apabila kehilangan pendingin terjadi berkaitan dengan kritikalitas reaktor. Persamaan *void reactivity coefficient* (VRC) diperlihatkan dalam persamaan (3) sampai dengan (5) (Permana & Suzuki, 2011). Nilai  $f_v$  dan  $k_x$  merupakan *void fraction* atau fraksi void (Kekosong bahan pendingin) dan nilai faktor kritikalitas efektif atau infinit.

$$\alpha_v = \frac{\Delta\rho}{\Delta f_v} \quad (10)$$

di mana

$$\Delta\rho = \rho_{void} - \rho_{normal} \quad (11)$$

$$\rho = \frac{k_x - 1}{k_x} \quad (12)$$

### 3.7 Efek Komposisi Thorium, Plutonium, dan Uranium Terkait Aspek Non-proliferasi Nuklir

Komposisi bahan bakar di reaktor akan mempengaruhi performa dari teras reaktor di antaranya faktor kritikalitas operation reaktor, *fuel breeding* dan juga komposisi bahan bakar nuklir selama proses reaksi berlangsung. Perbedaan daur ulang bahan bakar nuklir juga dapat mengakibatkan perbedaan produksi nuklida di dalam reaktor khususnya produksi thorium, uranium, plutonium dan juga aktinida minor. Dalam rangka mengevaluasi aspek intrinsik nuklir non-proliferasi, sensitivitas produksi transuranium terutama plutonium dari pengaruh proses pendinginan dan iradiasi, dalam penelitian ini produksi plutonium akibat pengaruh daur ulang bahan bakar nuklir yang berbeda-beda akan dilakukan. Transuranium tersebut terdiri atas plutonium dan aktinida minor atau minor actinide (MA). MA terdiri atas 3 material inti, yaitu neptunium (Np), americium (Am) dan curium (Cm) neptunium. Evaluasi produksi transuranium terdiri atas evaluasi material elemen dan juga masing-masing isotop elemen. Seperti contoh pada plutonium elemen, isotop plutonium yang akan di analisis adalah Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241 dan Pu-242, demikian pula dengan isotop masing-masing MA. Evaluasi komposisi plutonium akan menjadi prioritas dan sangat penting terutama dalam hal proses kategorisasi komposisi isotop plutonium. Lebih jauh lagi, dari jenis isotop plutonium yang dihasilkan dapat di analisis level material penghalang atau *material barrier* dari produksi isotop plutonium. Produksi MA dievaluasi untuk mengetahui berapa banyak komposisi yang dihasilkan sebagai bagian dari analisis non-proliferasi nuklir dan lebih jauh bahan bakar MA ini bisa digunakan sebagai salah satu alternatif meningkatkan nilai non-proliferasi nuklir sebuah reaktor di samping dapat juga meningkatkan *fuel breeding*. Komposisi elemen bahan nuklir berkaitan

dengan produksi masing-masing isotop elemen (isotop uranium  $U_i$ , isotop neptunium  $Np_i$ , isotop plutonium  $Pu_i$ , isotop americium  $Am_i$ , isotop curium  $Cm_i$ ). Untuk mengetahui komposisi vektor masing-masing isotop terhadap total komposisi elemen, digunakan persamaan di bawah ini. Pada persamaan di bawah ini diuraikan untuk komposisi vektor plutonium terhadap *heavy metal* (HM), dan dengan metode yang sama akan dievaluasi untuk elemen lainnya. Pengaruh pemanfaatan bahan bakar thorium atau campuran dengan uranium atau plutonium terhadap komposisi bahan bakar selama beroperasi dan komposisi pada aspek non-proliferasi khususnya terkait komposisi plutonium akan dianalisis.

$$VecPu_{tot} = \frac{Pu_{itot}}{HM_{tot}} \quad (13)$$

$$VecPu_i = \frac{Pu_i}{Pu_{tot}} \quad (14)$$

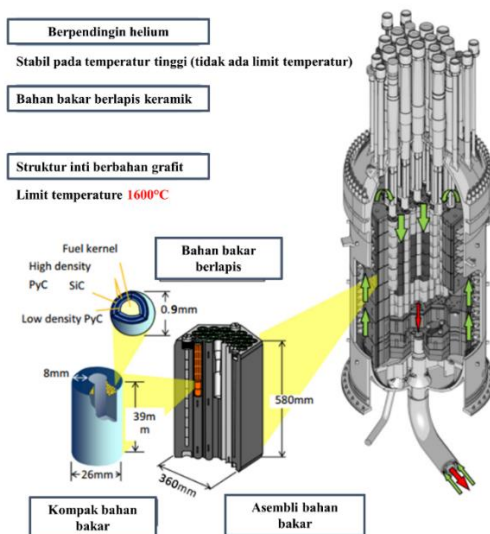
$$VecPu_{238} = \frac{Pu_{238}}{Pu_{tot}} \quad (15)$$

$$VecPu_{genap} = \frac{\sum_{i=1}^n Pu_{genap}}{Pu_{tot}} \quad (16)$$

$$VecPu_{genjil} = \frac{\sum_{i=1}^n Pu_{genjil}}{Pu_{tot}} \quad (17)$$

Salah satu pendekatan dalam mengetahui material penghalang plutonium adalah dengan cara mengevaluasi vektor komposisi dari masing-masing isotop plutonium ( $VecPu_i$ ). Yaitu setiap komposisi isotop plutonium menjadi sebuah nilai fraksi atau persentase dari total plutonium ( $Pu_{totali}$ ). Vektor komposisi isotop plutonium dievaluasi berdasarkan beberapa persamaan di atas. Dari vektor komposisi persamaan di atas, dapat ditambahkan analisis persentasi bobot pengaruh komposisi jumlah plutonium bernomor masa genap terhadap komposisi total plutonium, seperti contoh di atas untuk pengaruh Pu-238 atau Pu-240 terhadap keseluruhan plutonium. Untuk pengaruh komposisi daur ulang bahan bakar juga akan berpengaruh terhadap komposisi  $VecPu_{238}$  dan  $VecPu_{genap}$  di samping juga analisis

*VecPu<sub>ganjil</sub>* untuk mengetahui komposisi bahan bakar fisil plutonium atau *significant plutonium quantity*. Bagaimana komposisi plutonium ini dihasilkan dari pengaruh perbedaan daur ulang bahan bakar nuklir khususnya bahan bakar berbasis thorium dan campuran bahan bakar lainnya.



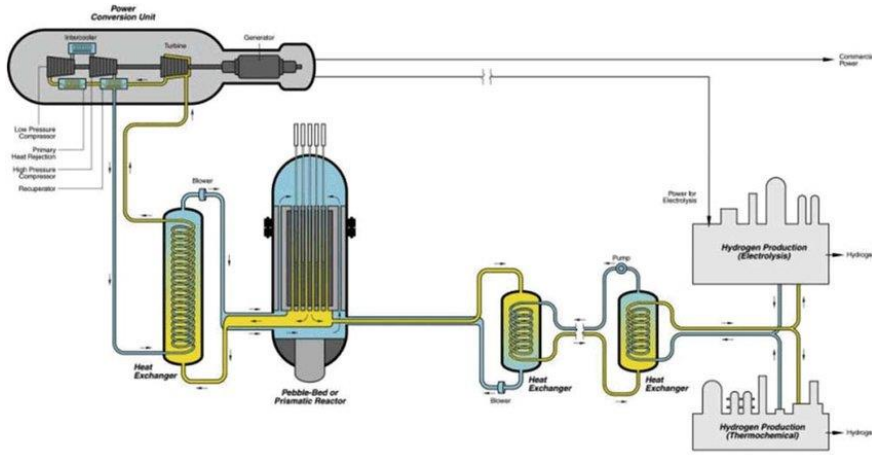
Gambar 54 Struktur dari HTTR (Iwatsuki et al, 2021)

### 3.8 Analisis Reaktor Generasi 4 dan *Small Modular Reactor* (SMR)

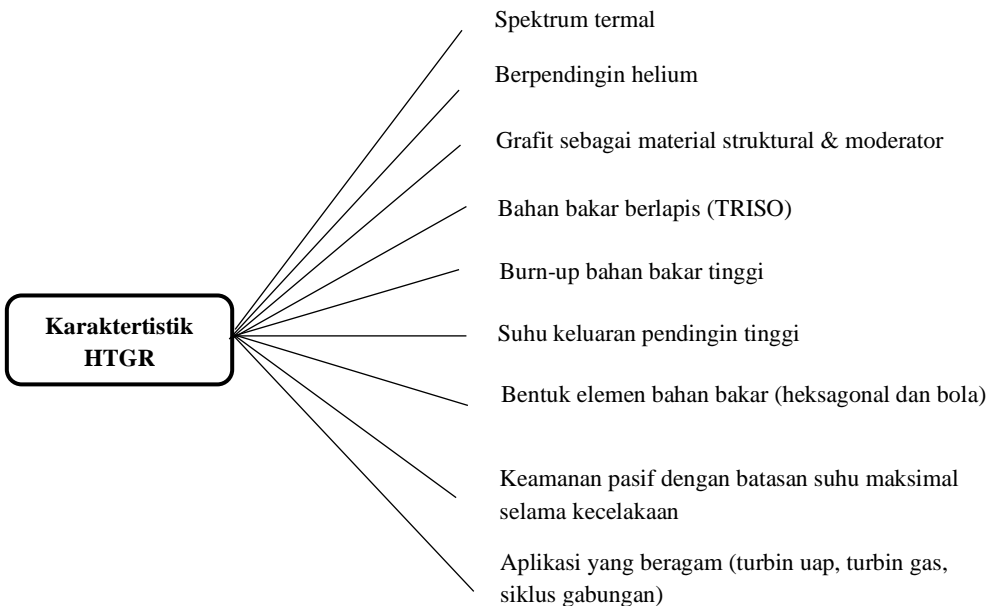
#### 3.8.1 Analisis Reaktor Berpendingin Gas Suhu Tinggi (HTGR).

Penggunaan zirkonium karbida (ZrC) sebagai pengganti silikon karbida (SiC) telah diusulkan untuk meningkatkan kinerja partikel bahan bakar berlapis pada reaktor berpendingin gas suhu tinggi (HTGR). Uji iradiasi pada ZrC telah membuktikan bahwa ZrC memiliki karakteristik yang sangat baik untuk bahan bakar HTGR dibandingkan dengan SiC, seperti kemampuan retensi produk fisi dan ketahanan yang lebih baik terhadap korosi produk fisi. Analisis neutronik pada HTGR 30 MWt menggunakan ZrC dan SiC telah dilakukan. Penelitian kemudian dilanjutkan untuk menganalisis partikel berlapis tri-struktural isotropik (TRISO) dengan ZrC dengan geometri dan daya yang berbeda. Referensi desain dalam penelitian ini adalah *High-Temperature Test Reactor* (HTTR), sebuah HTGR prismatic skala eksperimental

yang dibangun dan dioperasikan di Jepang seperti tampak pada **Gambar 59** dan **60** untuk skematik diagram HTGR secara umum yang mengkombinasikan produksi listrik dan produksi hidrogen untuk tipe HTGR pebble-bed.



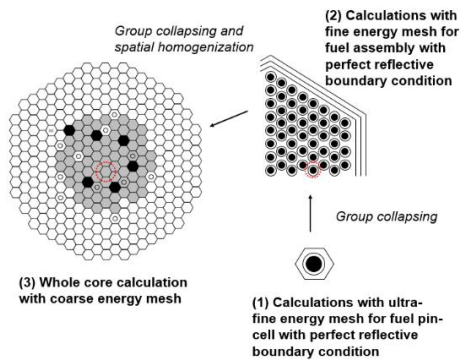
**Gambar 60** Skema HTGR yang terhubung dengan produksi hydrogen (Zohuri, 2018)



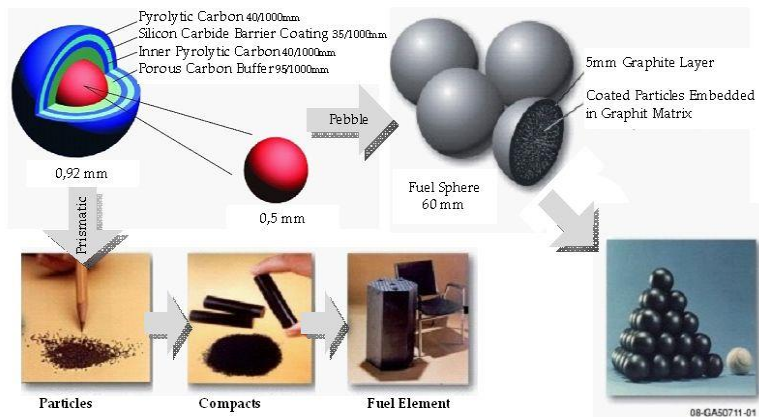
**Gambar 61** Beberapa karakteristik dari HTGR (Kugeler, 2019)

Beberapa keunggulan dari pemangsaan HTGR, seperti dijelaskan pada **Gambar 61**, menjelaskan karakteristik dasar HTGR dan beberapa keuntungannya. Dalam kegiatan Analisis ini, daya divariasikan pada kisaran

50-200 MWt, sedangkan geometri reaktor dimodifikasi dengan menambah lapisan bahan bakar pada arah aksial dan radial. Analisis neutronik dilakukan dengan menghitung  $k_{\text{eff}}$ ,  $k_{\text{inf}}$ , faktor puncak daya, tingkat pembakaran, spektrum neutron, dan efek doppler menggunakan lapisan ZrC dan SiC untuk partikel bahan bakar berlapis TRISO. Hasil penelitian menunjukkan bahwa partikel bahan bakar yang dilapisi dengan lapisan ZrC memiliki kinerja yang sama dengan SiC dengan perbedaan nilai yang tidak signifikan pada perhitungan aspek neutronik. Penelitian selanjutnya menganalisis kinerja neutronik dari tiga jenis bahan bakar berbasis thorium; torium oksida (Th, U-233)  $O_2$ , torium karbida (Th, U-233) C, dan torium nitrida (Th, U-233) N pada HTGR 200 MWt dan menggunakan lapisan Triso (ZrC). Hasil analisis neutronik menunjukkan bahwa kinerja thorium nitrida (Th, U-233) N pada faktor perkalian ( $k_{\text{eff}}$ ) lebih baik dibandingkan jenis bahan bakar lainnya. Reaktor dengan bahan bakar thorium nitrida (Th, U-233) N dapat mencapai target operasional reaktor selama 2480 hari.

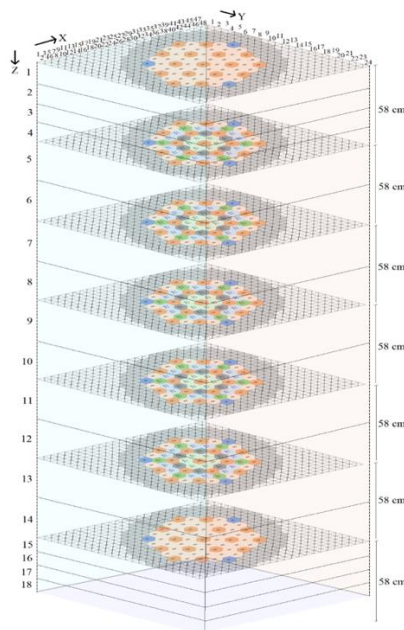


**Gambar 55** Prosedur Perhitungan Fisika Reaktor (Chiba, 2018)

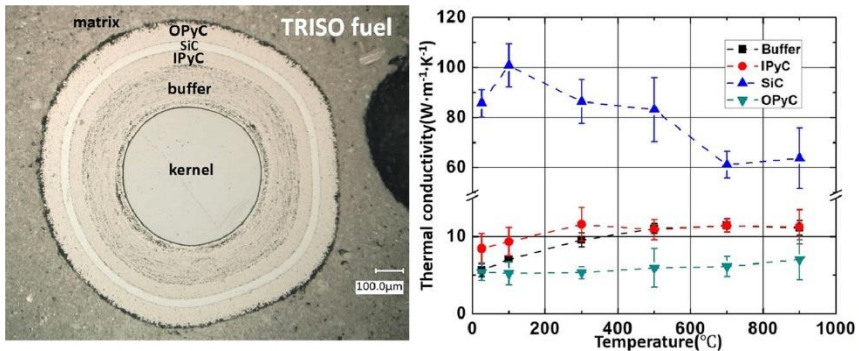


**Gambar 56** HTGR Prismatic dan Pebble Bed (Juliana, 2013).

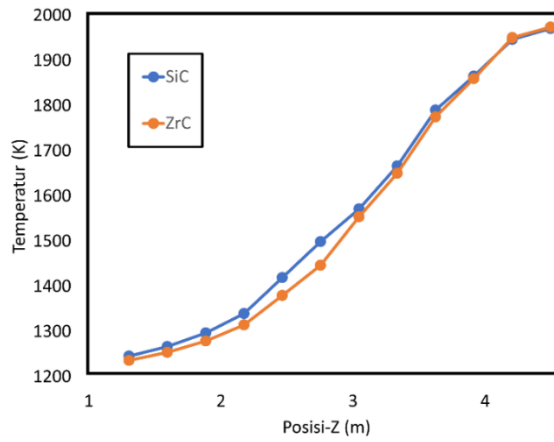
Nilai  $k_{\text{eff}}$  untuk thorium nitrida (Th, U-233) N pada akhir siklus adalah 1,050 lebih tinggi dari thorium karbida (Th, U-233) C dengan nilai 1,004. Pada saat yang sama, bahan bakar thorium oksida (Th, U-233) O<sub>2</sub> telah menjadi subkritis pada akhir periode. Aspek neutronik lainnya, seperti spektrum neutron dari ketiga bahan bakar, memiliki kecenderungan yang sama. Analisis neutron dalam penelitian ini menggunakan kode SRAC2006 dengan data *library* nuklir JENDL 4.0. Sebagaimana dijelaskan pada **Gambar 62** untuk proses evaluasi dari aspek neutroniknya. Pada aspek thermal hidrolis telah dihitung beberapa parameter seperti perubahan temperatur pada arah aksial dan penurunan tekanan pendingin. Lokasi yang dihitung adalah saluran dengan nilai densitas daya maksimum. Hasil perhitungan menunjukkan ZrC dan SiC memiliki kinerja yang sama baik dalam aspek thermal hidrolis pada kondisi normal. Penggunaan tipe bahan bakar HTGR dapat dilihat pada **Gambar 63** untuk tipe prismatic dan pebble bed, serta proses fuel fabrikasi dari partikel sampai pada fuel element yang siap digunakan (Miftahsani, 2021). **Gambar 64-67** proses analisis dan hasil dari evaluasi reaktor HTGR yang telah dilakukan dan sudah dipublikasi pada jurnal internasional bereputasi untuk tipe *prismatic* HTGR.



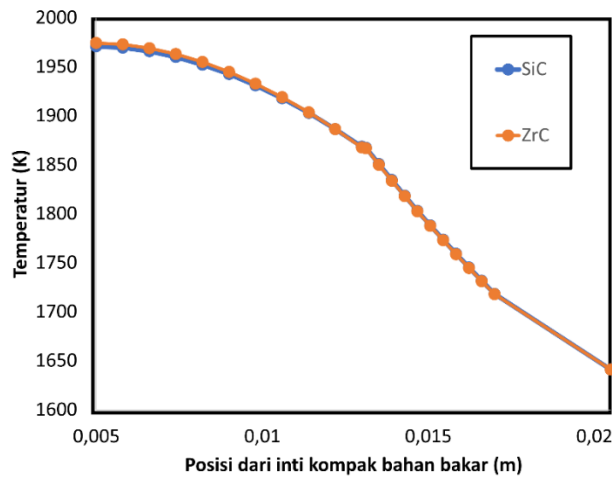
**Gambar 57** Ilustrasi 3D (X, Y, Z) teras reaktor HTGR (Pratama, 2018)



Gambar 58 Data koefisien konduktivitas TRISO (SiC) (Zang, 2022)



Gambar 59 Distribusi Temperatur pada Lapisan Dalam Kompak Bahan Bakar

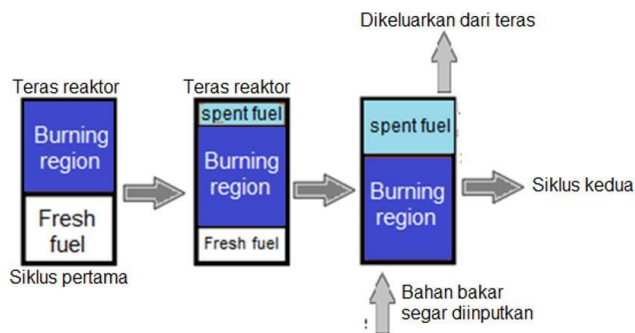


Gambar 60 Distribusi Temperatur pada Coated Fuel Particle

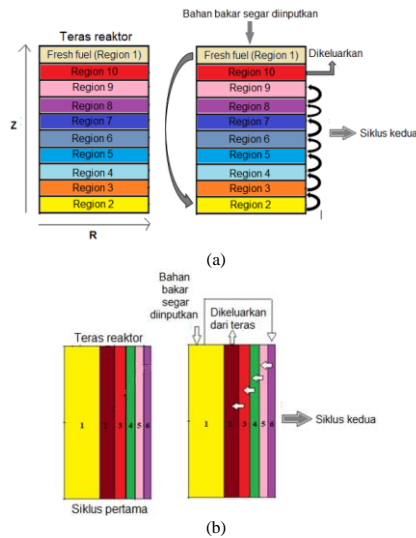


### 3.8.2 Analisis Reaktor Berpendingin Logam Cair dan MCANDLE.

Saat ini, tipe reaktor nuklir yang dominan di dunia adalah *Light Water Reactor* (LWR). Namun, pemanfaatan uranium alam pada LWR sangat rendah. Untuk mengoptimalkan pemanfaatan uranium alam sebagai bahan bakar, LWR harus melakukan proses pengayaan uranium-235. Namun, hanya sekitar 5% bahan bakar uranium diperkaya yang mengalami reaksi fisi. *Fast Breeder Reactor* (FBR) dengan siklus bahan bakar terbuka juga memanfaatkan uranium alam cukup rendah, karena menggunakan uranium yang diperkaya lebih tinggi sebagai bahan bakar. Sedangkan FBR dengan siklus bahan bakar tertutup memerlukan teknologi *reprocessing* bahan bakar bekas. Proses pengayaan uranium akan menyisakan banyak uranium sisa (*depleted uranium*). Baik teknologi pengayaan maupun *reprocessing* bahan bakar bekas merupakan isu yang sensitif dan juga mahal. Reaktor dengan skema *burn up* CANDLE (*Constant Axial shape of Neutron flux, nuclides densities, and power shape During Life of Energy production*) yang dimodifikasi (MCANDLE) dapat meningkatkan pemanfaatan uranium alam sebagai bahan bakar. Hal ini karena setelah beroperasi satu siklus, reaktor ini hanya memerlukan uranium alam sebagai input bahan bakar tanpa proses pengayaan dan *reprocessing* bahan bakar. Untuk memulai operasi reaktor diperlukan bahan bakar fisiil, contohnya plutonium. Sebagaimana digambarkan pada **Gambar 68** dan **Gambar 69**, untuk skema *burn up* CANDLE, dari siklus pertama, konfigurasi teras dan proses *refueling* dan *discharged fuel*, dan proses *shuffling* bahan bakar arah radial dan aksial CANDLE.



Gambar 61 Skema *burn up* CANDLE



**Gambar 62** Skema *burnup* MCANDLE dengan pembagian region bahan bakar pada arah (a) aksial (b) radial (Su'ud and Sekimoto, 2013b; Widiawati et al., 2020b)

Namun, skenario pengoperasian reaktor cepat pada tahun 2050 membuat pemuatan plutonium di reaktor harus dibuat seminimal mungkin. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan analisis terhadap penggunaan  $^{208}\text{Pb}$ -Bi sebagai pendingin karena penampang serapan neutron isotop  $^{208}\text{Pb}$  sangat rendah sehingga diharapkan dapat meminimalkan pemuatan bahan bakar di reaktor. Optimasi arah pengisian bahan bakar dilakukan sehingga diperoleh desain yang memiliki reaktivitas rata-rata sekitar  $1\% \Delta k/k$  dan *Power Peaking Factor* (PPF) kurang dari dua selama beroperasi. Kemudian, dilakukan analisis terhadap desain teras awal untuk desain optimasi tersebut dengan bahan bakar awal plutonium. Perhitungan neutronik dilakukan menggunakan SRAC (*Standard Reactor Analysis Code System*) dan JENDL (*Japanese Evaluated Nuclear Data Library*) 4.0 sebagai perpustakaan data nuklir. Perhitungan SRAC dengan menggunakan metode deterministik juga telah dibandingkan dengan hasil perhitungan MCNP6 (*Monte Carlo N particle-6*) yang menggunakan metode probabilistik. Parameter dasar desain reaktor dijelaskan pada **Tabel 3** dan karakteristik pendingin pada **Tabel 4**.

**Tabel 3** Parameter desain teras reaktor

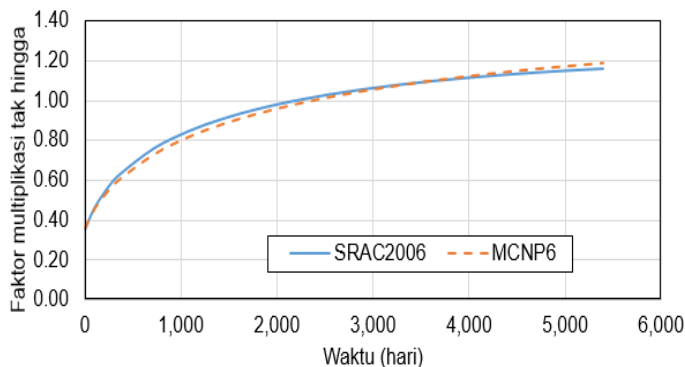
Parameter	Spesifikasi
Jari-jari teras	150 cm
Tinggi teras	160 cm
Ketebalan reflektor	50 cm
Daya termal reaktor	800 MWth dan 1250 MWth
Siklus pengisian bahan bakar	15 tahun
Masa operasi reaktor	90 tahun
Material bahan bakar	Uranium Nitrida ( <sup>15</sup> N)
<i>Smear density</i>	85%
Material kelongsong ( <i>cladding</i> )	HT-9
Material pendingin	<sup>208</sup> Pb (diperkaya 100%) - Bi eutectic
<i>Pin pitch/ pin fuel diameter</i>	1.4/ 1.232 cm
Fraksi bahan bakar- <i>cladding</i> - pendingin	65%-12.5%-22.5%

**Tabel 4** Sifat fisika dan kimia beberapa pendingin (T =700K)

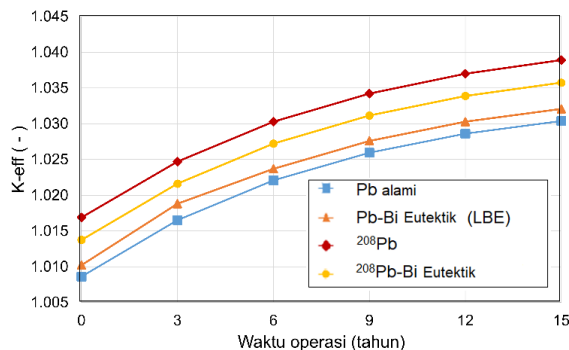
Sifat	Na	Pb	LBE (44.5%Pb dan 55.5%Bi)
Massa jenis (kg/m <sup>3</sup> )	850	10531	10169
Titik lebur (K)	371	600.6	397.7
<i>Q<sub>meit</sub></i> (J/mol)	2.64	4.9	8.01
Titik didih (K)	1154	2016	1943
<i>Q<sub>boil</sub></i> (J/mol)	99.2	178.0	
Konduktivitas termal (W/m.K)	70	16.9	13.4
Cp (J/mol.K)	29.2	30.2	30.1
Aktivitas kimia	Tinggi	rendah	rendah

Selisih hasil perhitungan optimasi masih di bawah 4% untuk kedua metode yang berbeda dari metode deterministik dibandingkan metode monte carlo, sebagaimana tampak pada **Gambar 70**. Hasil perhitungan lainnya menunjukkan bahwa, pendingin <sup>208</sup>Pb-Bi dapat meminimalkan pemuatan bahan bakar pada reaktor dengan skema burnup MCANDLE. Melalui optimasi arah pengisian bahan bakar juga diperoleh skema yang memiliki *excess* reaktivitas yang lebih rendah dari 1%  $\Delta k/k$  dan PPF lebih rendah dari dua selama waktu operasi. Skema ini juga memiliki tingkat pembakaran bahan bakar bekas uranium alam  $\sim 48\%$  FIMA (*Fissions per Initial Metal Atom*). Artinya, desain ini mampu meningkatkan pemanfaatan uranium alam karena

sekitar 48% uranium alam mengalami fisi tanpa proses pengayaan maupun pemrosesan ulang bahan bakar. Kemudian, diperoleh desain teras awal reaktor untuk skema terpilih yang memiliki nilai reaktivitas rata-rata sekitar 1%  $\Delta k/k$  selama operasi dengan menggunakan bahan bakar bekas *Advanced Pressurized Water Reactor* (APWR) (Widiawati, 2021).

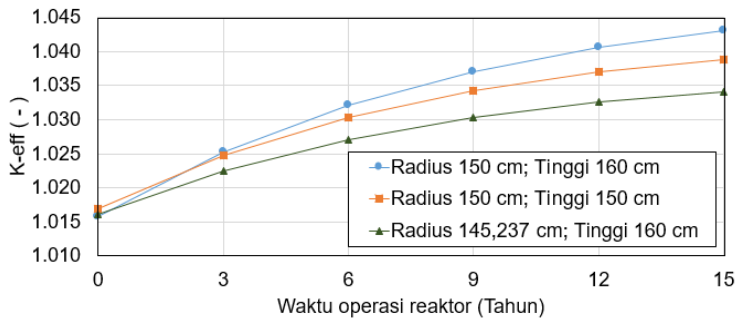


**Gambar 63** Faktor multiplikasi tak hingga (kinf) untuk pin bahan bakar uranium alam selama 15 tahun pembakaran.



**Gambar 71** Faktor multiplikasi efektif (keff) untuk semua reaktor dengan radius 150 cm dan tinggi teras aktif 160 cm.

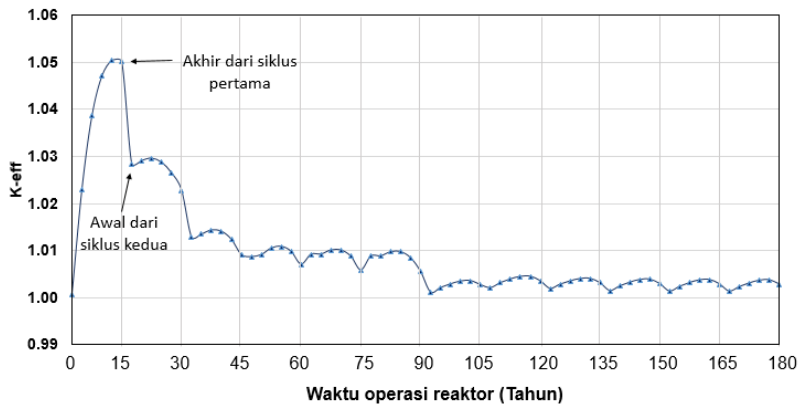
Berikut beberapa hasil evaluasi yang dijelaskan pada **Gambar 71-73** dan **Tabel 5** untuk hasil evaluasi perbedaan kritikalitas reaktor untuk pendingin yang berbeda, geometri radius dan ketinggian yang berbeda, pola kritikalitas untuk siklus refueling sampai lebih dari 100 tahun dan data faktor daya puncak arah radial untuk pendingin yang berbeda pada awal operasi (BOC) dan akhir operasi (EOC)



**Gambar 64** Nilai keff untuk reaktor berpendingin  $^{208}\text{Pb}$  yang diperkaya dengan ukuran berbeda.

**Tabel 5** Faktor puncak daya untuk semua reaktor dalam arah radial

Pendingin	BOC	EOC
Pb alam	1.959	1.618
LBE	1.937	1.605
$^{208}\text{Pb}$	1.838	1.550
$^{208}\text{Pb}$ -Bi eutektik	1.918	1.585

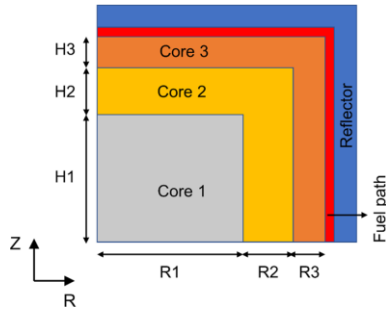


**Gambar 65** Perubahan faktor multiplikasi efektif (keff) untuk 12 siklus pengisian bahan bakar.

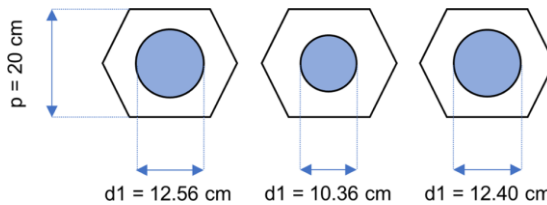
### 3.8.3 Analisis Reaktor Berbahan Bakar Garam Cair

Studi ini mengevaluasi Reaktor Garam Cair (*Molten Salt Reactor / MSR*) dengan daya listrik 100 Mega Watt (MWe) dengan bahan bakar plutonium untuk berbagai perbandingan pustaka data nuklir. Reaktor dengan keluaran daya sebesar 100 MWe ini diharapkan mampu memenuhi kebutuhan pembangkit listrik di beberapa wilayah atau provinsi di luar Pulau Jawa di Indonesia. Beberapa pustaka data nuklir, seperti JEFF 3.1, ENDF/B-VII.0, JENDL 3.3, dan

JENDL 4.0, telah digunakan untuk analisis performa reaktor secara lebih komprehensif. Berikut gambaran teras reaktor yang dianalisis untuk jenis reaktor MSR untuk tipe teras aktif yang berbeda seperti pada **Gambar 74 dan Gambar 75** untuk geometri grafit heksagonal dan kanal bahan bakar silinder untuk region teras yang berbeda.



**Gambar 66** Konfigurasi Teras arah radial dan axial dengan overview ¼ teras aktif

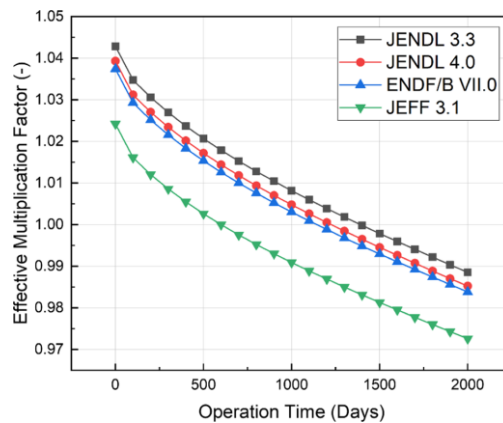


**Gambar 67** Geometri grafit heksagonal dan kanal bahan bakar silinder untuk region teras yang berbeda

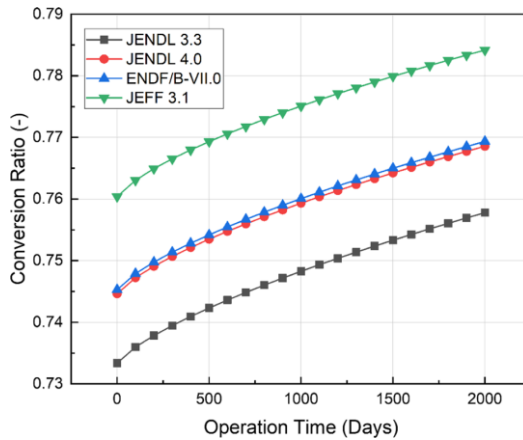
**Tabel 6** Parameters dasar daya 100 MWe *Molten Salt Reactor*

Reactor parameter	Specification
Power output (thermal)	250 MW <sub>Th</sub>
Power output (electric)	100 MWe
Thermal efficiency	40%
Operation time	2000 days
Initial fuel composition	LiF–BeF <sub>2</sub> –ThF <sub>4</sub> –PuF <sub>4</sub>
Temperature fuel salt (in/out)	833/973 K
Core	
Fuel volume fraction (av.)	36%
Diameter/height	4.72/4.66 m
Fuel path/duct	
Fuel volume fraction	90 vol%
Width	0.04 m
Reflector	
Fuel volume fraction	0.5 vol%
Thickness	0.30 m

Bahan Bakar garam cair jenis LiF – BeF<sub>2</sub> – ThF<sub>4</sub> – PuF<sub>4</sub> digunakan sebagai komposisi bahan bakar awal. Konsentrasi thorium dan plutonium dalam garam bahan bakar divariasikan untuk mendapatkan komposisi bahan bakar yang optimal, sehingga menyebabkan kondisi reaktor menjadi kritis. Parameter umum teras reaktor yang di evaluasi dijelaskan pada **Tabel 6** untuk daya listrik 100 MWe dan beberapa paramter lainnya seperti tipe bahan bakar cairnya, suhu operasional dan lainnya. Hasilnya menunjukkan beberapa parameter neutronik, seperti rasio konversi, spektrum neutron, dan faktor multiplikasi efektif, berdasarkan perbandingan tiga pustaka data nuklir berbeda. Hasil evaluasi ditampilkan untuk beberapa hasil di antaranya kritikalitas reaktor, *conversion rasio*, reaktivitas, skema optimasi metode *input* batang kendali atau *control rod*, dan beberapa hasil koefisien reaktivitas untuk bahan bakar dan moderator yang di gambarkan pada **Gambar 76-79** dan **Tabel 7-8**.

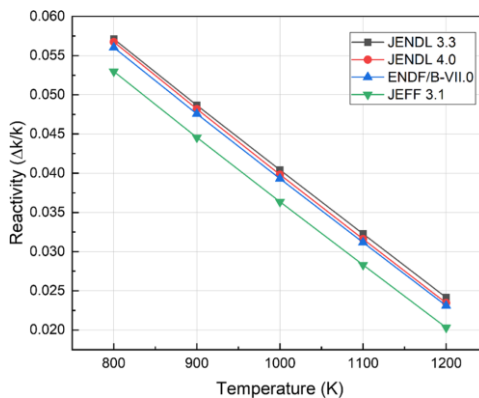


**Gambar 68** Comparison of  $k$  fuel for JENDL 3.3, JENDL 4.0, ENDF/B-VII.0, and JEFF 3.1



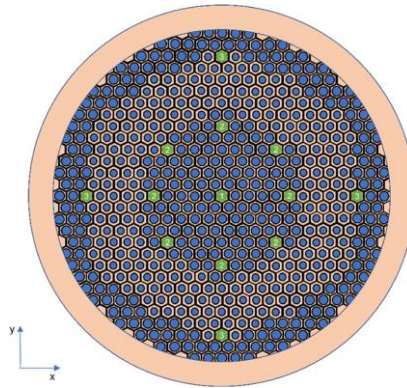
**Gambar 69** The conversion ratio of 0.80 mol% WGPu fuel with JENDL 3.3, JENDL 4.0, ENDF/B-VII.0, and JEFF 3.1

Dengan mengubah konsentrasi plutonium dalam komposisi garam bahan bakar awal, plutonium minimum yang dimuat untuk kekritisan reaktor selama 2000 hari waktu operasi ditentukan menjadi 0,995, 0,91, 0,87, dan 0,90 mol% untuk JEFF 3.1, ENDF/B-VII.0, JENDL 3.3, dan JENDL 4.0, masing-masing. Perbedaan nilai masing-masing parameter disebabkan oleh beberapa faktor, seperti nilai penampang dan jumlah nuklida yang ada di perpustakaan data nuklir. Beberapa parameter keselamatan juga diselidiki untuk memastikan kemungkinan pemanfaatan PuF<sub>4</sub> di dalam reaktor (Wulandari et al., 2022).



**Gambar 70** The reactivity with different temperatures for JENDL 3.3, JENDL 4.0, ENDF/B-VII.0, and JEFF 3.1





**Gambar 71** Distribusi kontrol *rod* pada teras reaktor

**Tabel 7** Koefisien temperatur *Moderator coefficient* (MTC) dan Koefisien reaktivitas Doppler (DRC) reaktor reaktor untuk pustaka nuklir yang berbeda

Nuclear Libraries	JENDL 3.3	JENDL 4.0	ENDF/B-VII.0	JEFF 3.1
MTC (pcm/K)	-2.34	-2.37	-2.30	-2.28
DRC (pcm/K)	-8.17	-8.24	-8.15	-8.08

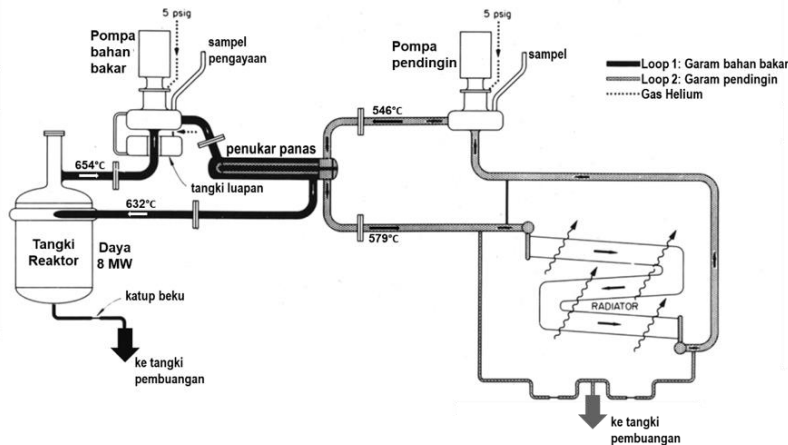
**Tabel 8** Nilai Initial  $k_{eff}$ , reaktivitas, dan *Doppler reactivity coefficient* (DRC) untuk model teras reaktor yang berbeda

Coefficient	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
Initial $k_{eff}$	1.0530	1.0491	0.9964	0.9829
Reactivity ( $\Delta k/k$ )	0.00503	0.0468	-0.0036	-0.0174
DRC (pcm/K)	-	349.40	5395.77	6777.93

### 3.8.4 Pengembangan Loop Garam Cair Sebagai Aparatus Keselamatan Reaktor Nuklir

Loop sirkulasi alami menjadi topik penting dalam analisis transfer panas pada pembangkit energi tanpa bantuan pompa resirkulasi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis parameter-parameter yang diperlukan dalam pengembangan loop garam cair dan aspek keselamatan sebuah sistem reaktor nuklir berbahan bakar cair. Skematik dari desain *Molten Salt Reactor Experiment* (MSRE) ditunjukkan **Gambar 80**. Bahan bakar disirkulasi dalam inti reaktor dan juga bertindak sebagai pendingin. Fluida pada loop utama dari MSRE terdiri atas campuran garam  $\text{LiF-BeF}_2\text{-ZrF}_4\text{-UF}_4$  (61,0:29,1:5,0:0,9 %

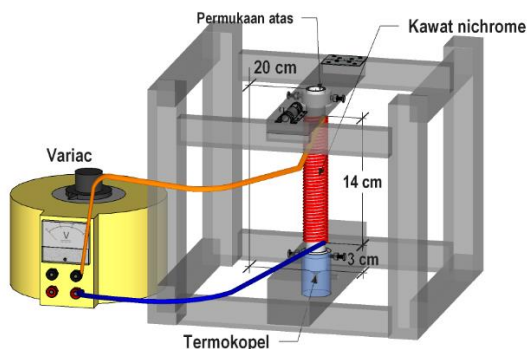
mol), sementara loop kedua dari MSRE terdiri atas campuran garam LiF-BeF<sub>2</sub> (66:34 % mol) (Roper dkk., 2022). Panas dihasilkan di dalam inti reaktor dan diangkut oleh garam bahan bakar ke penukar panas sebelum kembali ke inti reaktor. MSRE beroperasi pada tekanan atmosfer dan tidak menggunakan air, sehingga menghilangkan risiko ledakan uap atau hidrogen (Elsheikh, 2013). Garam bahan bakar dan garam pendingin disirkulasikan oleh pompa sentrifugal dengan desain hidraulik konvensional.



**Gambar 80** Skematik dari desain *Molten Salt Reactor Experiment* (MSRE) (Sumber: Haubenreich dan Engel, 1970)

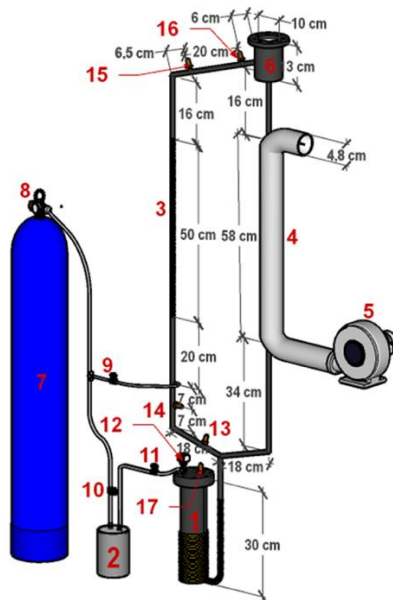
Analisis transisi fase garam diselidiki secara eksperimental dan komputasional pada aparatus yang dibangun mengikuti pemanas pada loop sirkulasi alami. Variasi daya pemanasan dilakukan dalam mempelajari transisi fase garam NaNO<sub>3</sub>, garam KNO<sub>3</sub>, dan campuran eutektik dari keduanya. Pada daya yang sama, perbedaan efisiensi antara garam eutektik dan garam KNO<sub>3</sub> mencapai 72,2%, sedangkan dengan garam NaNO<sub>3</sub> mencapai 97,7%. Hasil eksperimental dan pemodelan menggunakan ANSYS Fluent menunjukkan bahwa temperatur leleh yang rendah dan panas laten yang rendah merupakan karakteristik penting dari garam sebagai pertimbangan fluida kerja untuk pemanasan yang efisien dalam loop garam cair. Garam Kalium nitrat (*Potassium nitrate/KNO<sub>3</sub>*) dan Natrium nitrat (*Sodium nitrate/NaNO<sub>3</sub>*) produk Loba Chemie digunakan sebagai garam dasar dalam penelitian. Mengadopsi prosedur yang dilakukan oleh Han dkk. (2022) dan Zhang dkk. (2022), pembuatan garam campuran eutektik dari NaNO<sub>3</sub>+KNO<sub>3</sub> yaitu dimulai dengan menimbang kedua garam, NaNO<sub>3</sub> dan KNO<sub>3</sub>, diikuti dengan mencampur dan menumbuk kedua garam di dalam mortar dengan

komposisi mol yang telah ditentukan. Transisi fase garam Kalium nitrat murni, Natrium nitrat murni, dan campuran 50%mol  $\text{NaNO}_3$ :50%mol  $\text{KNO}_3$  dipelajari menggunakan apparatus yang disusun. Gambaran apparatus yang digunakan dijelaskan pada **Gambar 81** dalam bentuk skematik apparatus eksperimen transisi garam cair.



**Gambar 81** Skematik apparatus eksperimen transisi fase garam. (Hariyanto, D., 2023)

Sebelum garam dimasukkan ke dalam apparatus pipa, massa garam ditimbang sesuai volume pipa dan massa jenis garam. Dengan demikian, volume garam di dalam pipa untuk setiap eksperimen adalah sama, yaitu  $73 \text{ cm}^3$ . Kemudian, garam dipanaskan menggunakan mantel pemanas hingga mencair sepenuhnya. Garam dalam keadaan cair dimasukkan ke dalam pipa, kemudian didinginkan hingga temperaturnya mencapai temperatur ruang. Dalam kasus ini, temperatur ruangan diukur menggunakan sensor DHT11 dengan hasil pembacaan ketika eksperimen dilakukan, yaitu pada rentang  $27\text{-}30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Analisis transfer panas pada loop garam cair berdasarkan sumber pustaka dimodelkan dengan bantuan perangkat lunak COMSOL Multiphysics. Pemodelan kondisi tunak, peningkatan daya, dan penurunan daya dari loop persegi panjang dengan fluida kerja garam  $\text{NaNO}_3+\text{KNO}_3$  dilakukan dalam pekerjaan ini. Di samping itu, loop sirkulasi alami dibangun dalam pekerjaan ini untuk dianalisis secara eksperimental dan pemodelan. Dua jenis loop yang dibangun membentuk persegi panjang dan segi lima sembarang. Kedua jenis loop dilengkapi pemanas yang dibuat dari kawat nichrome, serta pendingin yang disusun dari pipa berdiameter kecil di dalam pipa berdiameter lebih besar sehingga fluida dapat dialirkan di antara anulus kedua pipa. Persentase perbedaan bilangan Reynolds antara fluks daya pemanas tertinggi dan terendah mencapai 38,7% pada loop segi lima sembarang.



Keterangan:

1. Tangki Penyimpanan
2. Tangki Kapasitor
3. Pemanas Utama
4. Pendingin
5. Blower
6. Tangki Ekspansi
7. Tabung Gas
8. Regulator Gas

9. Solenoid Valve 1
10. Solenoid Valve 2
11. Solenoid Valve 3
12. Digital Pressure Meter
13. Termokopel Tipe-K 1 (TC1)
14. Termokopel Tipe-K 2 (TC2)
15. Termokopel Tipe-K 3 (TC3)
16. Termokopel Tipe-K 4 (TC4)
17. Termokopel Tipe-K 5 (TC5)

**Gambar 72** Skematik aparatus loop sirkulasi alami segi lima sembarang. (Hariyanto, D., 2023)

Hasil menunjukkan bahwa semakin tinggi daya yang diberikan, semakin tinggi nilai bilangan Reynolds pada kondisi tunak. Penelitian ini dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang parameter-parameter dalam pengembangan loop garam cair dan potensi aplikasi teknologi pada pembangkit energi khususnya reaktor nuklir jenis bahan bakar garam cair (Hariyanto, 2023). Berikut adalah gambaran umum aparatus loop untuk evaluasi ini digambarkan pada **Gambar 82** dan **Gambar 83** untuk Skematik aparatus loop sirkulasi alami segi lima sembarang dan Bentuk fisik aparatus loop sirkulasi alami segi lima sembarang. Aparatus eksperimen loop segi lima sembarang (*irregular pentagon loop*) dibangun untuk mengetahui karakteristik aliran dari fluida berupa air maupun garam cair tanpa bantuan pompa sirkulasi. Aparatus eksperimen dibangun menggunakan bahan yang tahan korosif, dapat menangani fluida bertemperatur di atas 100 °C tanpa kontak dengan tangan manusia, dan memiliki fasilitas akuisisi data

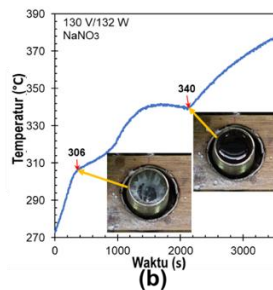
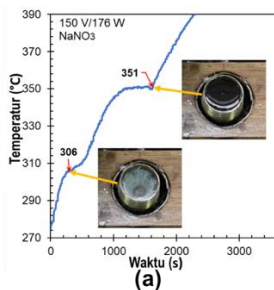
temperatur dan tekanan secara langsung dan terus-menerus. Dalam penelitian ini, fluida yang digunakan adalah air, dengan tujuan untuk menguji keandalan sistem yang dirancang sebelum digunakan untuk garam cair yang bertemperatur tinggi. Beberapa hasil evaluasi digambarkan pada **Gambar 84-86** untuk fenomena transisi fase garam cair, distribusi temperatur, model pemanasan garam, efisiensi pemanasan dan perbandingan hasil dengan model lainnya.

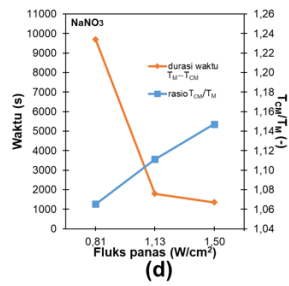
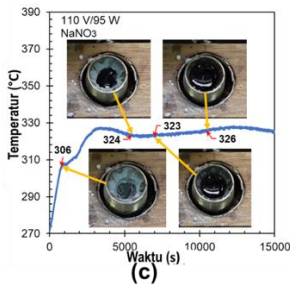


Keterangan:

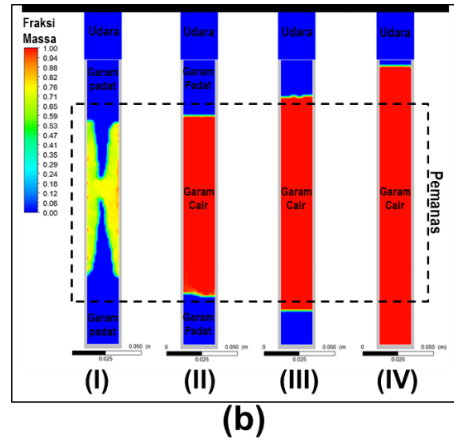
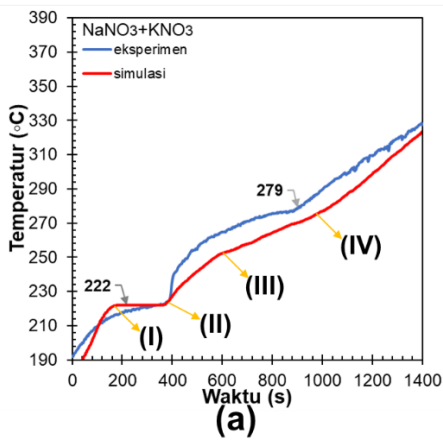
- |   |   |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tangki Penyimpanan</li> <li>2. Tangki Kapasitor</li> <li>3. Pemanas Utama</li> <li>4. Pendingin</li> <li>5. Blower</li> <li>6. Tangki Ekspansi</li> <li>7. Tabung Gas</li> <li>8. Regulator gas</li> <li>9. Solenoid Valve 1</li> <li>10. Solenoid Valve 2</li> <li>11. Solenoid Valve 3</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>12. Digital Pressure Meter</li> <li>13. Termokopel Tipe-K 1 (TC1)</li> <li>14. Termokopel Tipe-K 2 (TC2)</li> <li>15. Termokopel Tipe-K 3 (TC3)</li> <li>16. Termokopel Tipe-K 4 (TC4)</li> <li>17. Termokopel Tipe-K 5 (TC5)</li> <li>18. Raspberry Pi</li> <li>19. Monitor</li> <li>20. Keyboard</li> <li>21. Mouse</li> <li>22. Data Acquisition (DAQ) System</li> <li>23. Relay</li> </ol> |
|---|---|

**Gambar 73** Bentuk fisik aparatus loop sirkulasi alami segi lima sembarang.

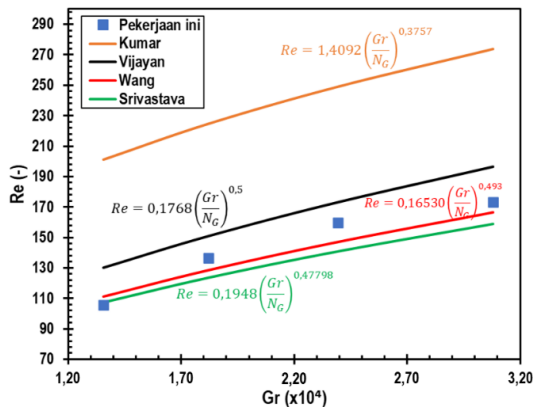




**Gambar 74** Transisi fase garam  $\text{NaNO}_3$  pada daya (a) 176 W (b) 132 W, dan (c) 95 W; (d) pengaruh daya terhadap  $t_{M-CM}$  dan  $T_{CM}/T_M$ . (Hariyanto, D., 2023)



**Gambar 75** Hasil pemodelan pemanasan garam campuran eutektik dari  $\text{NaNO}_3+\text{KNO}_3$  di dalam aparatus pada daya 95 W (a) perbandingan temperatur hasil pemodelan dengan hasil eksperimen (b) perubahan fraksi massa garam cair (Hariyanto, D., 2023)



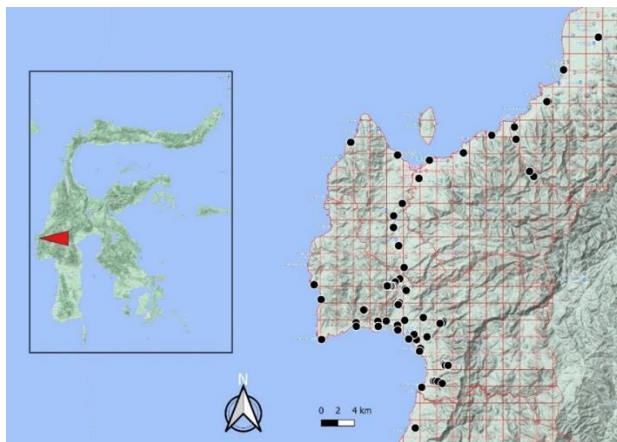
**Gambar 86** Perbandingan hasil pemodelan pekerjaan ini dengan korelasi dari beberapa referensi. (Hariyanto, D., 2023)

### 3.8.5 **Monitoring Radiasi Lingkungan dan Pemetaan Sumber daya Radioaktif di Indonesia.**

Di alam, unsur uranium dan thorium adalah dua unsur radioaktif utama yang terdepositasi dalam bentuk mineral dengan estimasi kelimpahannya di kerak bumi adalah 1 hingga 2,7 ppm untuk uranium dan ~10 ppm untuk thorium (Hazen dkk, 2009). Kehadiran unsur radioaktif dalam bentuk mineral yang terkandung dalam batuan dan tanah adalah sumber utama radiasi alamiah di bumi atau yang biasa dikenal sebagai *terrestrial radiation source*. Daerah-daerah tertentu di dunia yang memiliki nilai radiasi alamiah tinggi biasanya berhubungan dengan deposit mineral radioaktif, ditandai dengan nilai laju dosis radiasi yang tinggi. Daerah-daerah yang memiliki anomali nilai radiasi alamiah yang tinggi dikenal sebagai *High Natural Background Radiation Areas* (HNBRA), di antaranya berada di Ramsar (Iran), Kerala (India), Yang Jiang (Tiongkok), dan Pocos del Caldas (Brazil) (Aliyu dan Ramli, 2015). Di Indonesia, Kabupaten Mamuju, Sulawesi Barat, adalah daerah dengan latar belakang radiasi alamiah tertinggi (D. Iskandar dkk, 2014). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh BATAN (sekarang BRIN) pada tahun 2011, terukur nilai laju dosis radiasi secara umum tinggi mencapai nilai rata-rata 300 nSv/jam (0,3  $\mu$ Sv/jam atau 2,6 mSv/tahun). Temuan lebih detil di desa Takandeang diperoleh nilai laju dosis yang mencapai 2.844 nSv/jam (2,844  $\mu$ Sv/jam) (D. Iskandar, 2014; LAKIN BATAN, 2018).

Tingginya nilai laju dosis radiasi gamma alamiah di Kabupaten Mamuju ini menunjukkan keterdapatan unsur radioaktif uranium, thorium dan potassium yang mengalami mineralisasi dan terdeposit pada batuan. Berdasarkan penelitian, tipe mineralisasi yang terjadi adalah tipe vulkanik hasil aktivitas magmatik dari Gunung Api Adang (H. Syaeful dkk, 2014; I.G. Sukadana dkk, 2015; I.G. Sukadana dkk, 2016; I.G. Sukadana dkk, 2018; Ilsa Rosianna dkk, 2020). Hosoda dkk. (2021), mengukur bahwa dosis efektif yang diterima penduduk, khususnya di Desa Botteng, mencapai 27 mSv, sementara rata-rata dosis efektif yang diterima individu secara global adalah 2,4 mSv. Ini menunjukkan bahwa mineralisasi unsur radioaktif yang masif dapat memberikan efek pada kesehatan manusia sehingga perlu dilakukan studi epidemiologi. Dalam penelitian ini, dilakukan pengukuran laju dosis radiasi alamiah di atas permukaan tanah (*ambient dose*) dan pengambilan sampel tanah, rumput, air, dan batu. Akuisisi data dilakukan di hampir seluruh daerah yang terindikasi menjadi deposit mineral radioaktif. Teknik

pengukuran dilakukan dengan sistem grid, di mana ukuran setiap gridnya adalah 2 x 2 km<sup>2</sup>. Di setiap grid-nya diukur nilai laju dosis dengan menggunakan alat NaI(Tl) Scintillator, Geiger Muller, dan Portable Personal Dosimeters. Serta dilakukan pengambilan sampel. Setiap sampel yang diambil akan dianalisis secara geokimia (XRD, XRF, SEM, dan ICP-MS) untuk mengetahui jenis unsur dan mineral yang terkandung didalamnya serta untuk mengetahui unsur jejaknya. Sementara untuk mengetahui efeknya terhadap lingkungan, akan dilakukan pengukuran dosis radiasi pada sampel tanah, rumput, dan air di laboratorium dengan metode HPGe. Penelitian telah mencapai target pengambilan data di Kabupaten Mamuju, Sulawesi Barat, yang mewakili daerah dengan radiasi alamiah tinggi. Di mana kegiatan penelitian di Kabupaten Mamuju dilaksanakan pada tanggal 6 Agustus 2022 hingga 8 September 2022. Penelitian ini mengambil lokasi di area yang terindikasi terdapat deposit mineral radioaktif dan di sekitarnya.



pengambilan Gambar 87 Titik lokasi data di Kabupaten Mamuju







Gambar 76 Suasana pengukuran radiasi alamiah di Kabupaten Mamuju

Teknik pengukuran data yang dilakukan menggunakan metode *systematic random technique* yang berupa kotak-kotak (grid) yang didisain berukuran 2 km x 2 km, dan pengambilan data dapat dilakukan di sembarang dalam kotak (grid) tersebut tampak pada **Gambar 87**. Sebanyak 75 data terekam selama penelitian, yang meliputi data laju dosis hasil pengukuran alat sintilator NaI(Tl), Geiger Muller, dan personal dosimeter serta data dosis kumulatif hasil perekaman alat personal dosimeter. **Gambar 88** menjelaskan suasana pengambilan data di medan yang bervariasi, **Gambar 89** memperlihatkan kertas kerja (*worksheet*) di mana data hasil pengukuran dituliskan, dan **Gambar 90** memperlihatkan sampel-sampel tanah, rumput, dan batuan yang akan diteliti di laboratorium.

DATA PENGUKURAN LAJU DOSES GAMMA (AMBIENT GAMMA DOSE RATE)  
KABUPATEN MAMUJU, SULAWESI BARAT

Operator: Sidiq Permana, Sidiq Permana  
Kontak: 0812-4111-1111

Cumulative

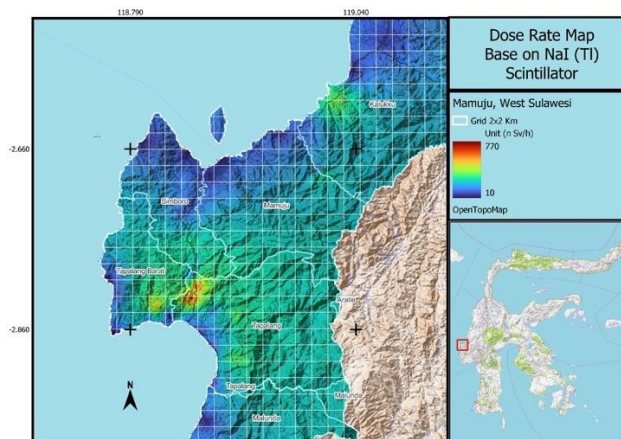
No.	Kategori/Tempat	x	y	z	Alat Ukur	Unit	Saluran	Tempo	Jarak	Geiger Muller	Flux Rate	Flux	Keterangan
1	di atas lapangan	9700157	9702170	11 m	NaI	CPM	0,01 0,01 0,01	0,11 0,11 0,11	0,18	0,370	0,152	0,00	10 Jan
2	di atas lapangan	9700081	9700954	10 m	Geiger Muller	CPM	0,01 0,01 0,01	0,06 0,06 0,06	0,48	0,300	0,842	0,4	10 Jan
3	di atas lapangan	9700500	9706899	3 m	Geiger Muller	CPM	0,01 0,01 0,01	0,05 0,05 0,05	0,37	0,740	0,750	0,5	23 Jan
4	di atas lapangan	9700033	9705191	10 m	Geiger Muller	CPM	0,01 0,01 0,01	0,15 0,15 0,15	0,45	0,320	0,283	0,800	23 Jan
5	di atas lapangan	9704111	9705059	13 m	Geiger Muller	CPM	0,10 0,10 0,10	0,18 0,18 0,18	0,56	0,600	0,461	0,800	23 Jan
6	di atas lapangan	9704500	9707674	22 m	Geiger Muller	CPM	0,01 0,01 0,01	0,19 0,19 0,19	0,08	1,151	0,012	0,900	23 Jan
7	di atas lapangan	9702029	9708160	10 m	Geiger Muller	CPM	0,01 0,01 0,01	0,21 0,21 0,21	0,18	1,201	0,009	0,800	23 Jan
8	di atas lapangan	9704301	9711273	27 m	Geiger Muller	CPM	0,01 0,01 0,01	0,34 0,34 0,34	0,02	0,45	1,54	0,800	23 Jan
9	di atas lapangan	9724151	9711717	22 m	Geiger Muller	CPM	0,01 0,01 0,01	0,39 0,39 0,39	0,02	1,439	1,443	0,800	23 Jan
10	di atas lapangan	9706152	9715082	6 m	Geiger Muller	CPM	0,01 0,01 0,01	0,23 0,23 0,23	0,05	1,505	0,770	0,800	23 Jan

Gambar 89 Lembar data pengukuran



**Gambar 77** Sampel tanah dan rumput yang diambil di daerah penelitian.

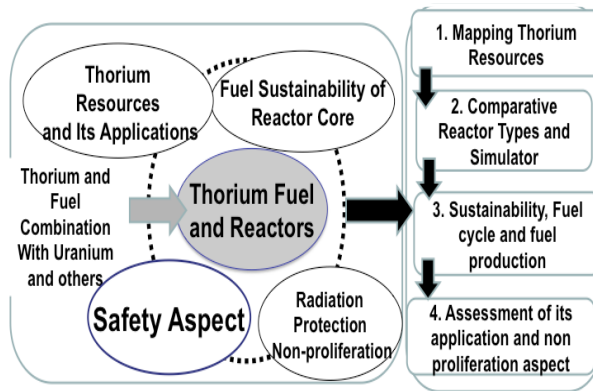
Hasil perekaman data radiasi alamiah di Kabupaten Mamuju, kemudian diolah untuk memperoleh informasi yang berkaitan dengan nilai radiasi yang terukur. Di mana dari pengolahan data dari alat sintilator NaI(Tl) dan Geiger Muller diperoleh peta sebaran radiasi alamiah di Kabupaten Mamuju dan analisis data dosis annual ekivalen yang menggambarkan dosis radiasi yang diserap oleh daerah penelitian. **Gambar 91 - 92** memperlihatkan peta sebaran laju dosis radiasi dari data pengukuran sintilator NaI(Tl).



**Gambar 78** Peta laju dosis radiasi Kabupaten Mamuju dari data pengukuran sintilator NaI(Tl) (1m di atas permukaan).

Sementara itu, untuk memahami bagaimana efek radiasi yang tinggi ini terhadap lingkungan, dihitung besar dosis annual efektif yang





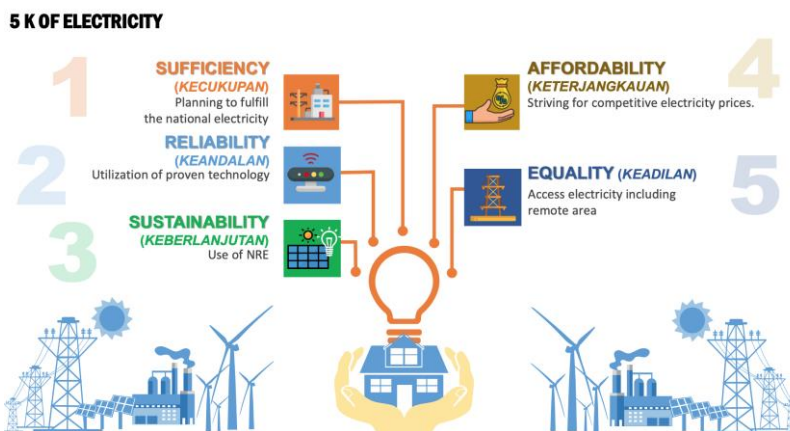
**Gambar 93** Skematik dan Tahapan Penelitian Thorium dan Reaktor Thorium

**Gambar 93** menjelaskan skematik diagram parameter penting dalam pengembangan analisis bahan bakar Thorium dan Reaktor Thorium beserta tahapan evaluasinya. Beberapa hasil evaluasi reaktor Thorium untuk desain teras reaktor berbasis *light water reactor* (LWR) atau reaktor berpendingin air ringan, dan juga evaluasi teras reaktor berbahan bakar Thorium untuk tipe *high temperature Gs-cooled Reactor* (HTGR) atau reaktor temperatur tinggi berpendingin gas. Penggunaan *Small Modular Reactor* (SMR) dan mikro reaktor memiliki potensi keuntungan besar bagi Indonesia. Keunggulan utama meliputi ukuran yang lebih kecil, aksesibilitas ke daerah terpencil, dan tidak memerlukan lahan yang luas. Salah satu SMR yang menonjol adalah NuScale Power Module (NPM) berdaya termal 160 MWt dengan siklus operasi 2 tahun. Namun, ada minat meningkat dalam mencari bahan bakar alternatif untuk meningkatkan kinerja dan keselamatan SMR. Thorium menjadi opsi menarik karena karakteristik neutronnya yang unggul dan potensi efisiensi bahan bakar yang lebih tinggi. Penambahan thorium meningkatkan efisiensi dalam mengubah material subur menjadi material fisil dengan kritisitas yang cukup, di mana bahan bakar yang mengandung thorium memiliki CR (Rasio Konversi) yang lebih tinggi. Selain itu, siklus bahan bakar thorium memiliki produksi isotop plutonium yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan siklus bahan bakar lainnya. Namun, perbandingan performa pada variasi daya memerlukan modifikasi dalam segi geometri, panjang operasi, atau pengayaan nuklida fisilnya. Proses ini memberikan wawasan awal tentang potensi penggunaan bahan bakar thorium dalam SMR, menyoroti manfaatnya dalam meningkatkan efisiensi bahan bakar dan keselamatan reaktor, serta menciptakan landasan untuk penelitian lebih lanjut.

## 4. ENERGI NUKLIR DALAM PROGRAM NZE 2060 INDONESIA

### 4.1 Analisis Kondisi Kelistrikan Nasional

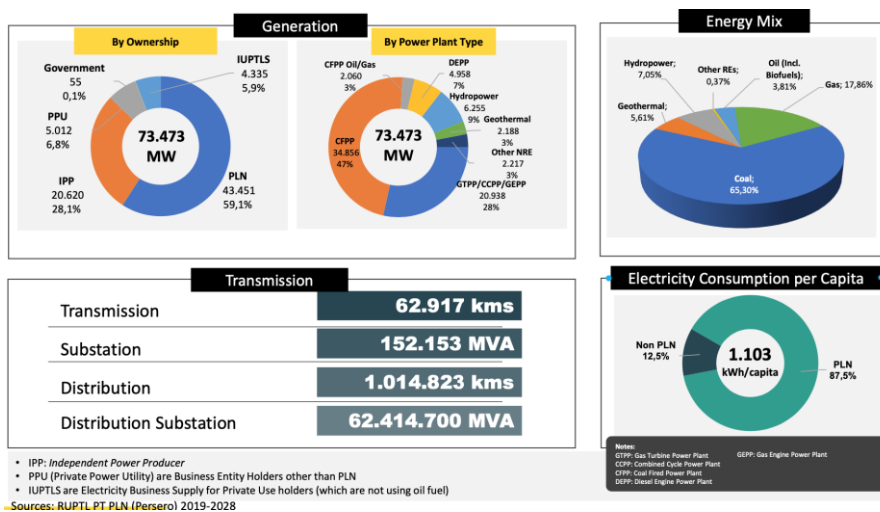
Untuk memastikan keseimbangan antara pasokan dan kebutuhan listrik di dalam negeri, pemerintah Indonesia mengadopsi filosofi prinsip 5K. Prinsip-prinsip tersebut adalah untuk Kecukupan, Keandalan, Keberlanjutan, Keterjangkauan, dan Keadilan dalam bahasa Indonesia yang diterjemahkan sebagai prinsip Cukup atau Memadai, Andal, Berkelanjutan, Terjangkau, dan Berkeadilan (SRSAE) seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 94** (MEMR, 2020). Pemerintah memiliki perencanaan kebutuhan listrik nasional, termasuk program 35.000 MW serta program net-zero emission 2060 yang menjadi program untuk memenuhi kecukupan atau kecukupan. Untuk memastikan prinsip 'Andal', pemerintah memastikan semua pasokan energi berasal dari energi berbasis sumber daya alam dan energi berbasis teknologi yang telah teruji di tingkat industri maupun komersial.



**Gambar 94** Filosofi Prinsip 5K Kelistrikan di Indonesia (MEMR, 2020)

Dengan mengoptimalkan sumber daya alam dan potensinya termasuk mendorong penggunaan energi baru dan terbarukan untuk penyediaan energi, prinsip 'Berkelanjutan' dapat diupayakan. Prinsip lainnya adalah 'Terjangkau' yang akan memanfaatkan harga listrik yang kompetitif sehingga masyarakat Indonesia memiliki akses listrik dan dapat membelinya. Prinsip terakhir adalah 'Pemerataan' yang berarti mengutamakan pemerataan akses

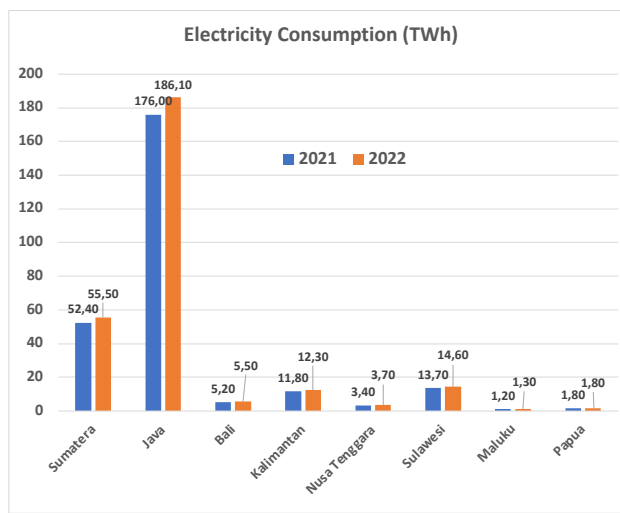
listrik dengan menaikkan rasio elektrifikasi (MEMR, 2020). Berdasarkan status kelistrikan di Indonesia pada tahun 2021, telah dihasilkan kapasitas listrik sekitar 73,5 GWe untuk memenuhi kebutuhan energi di Indonesia seperti terlihat pada **Gambar 95**. PLN sebagai Badan Usaha Milik Negara mengoperasikan 59% pembangkit listrik dan swasta perusahaan dalam skema IPP telah beroperasi 28%. Dalam hal bauran energi dari berbagai sumber energi, dapat diperkirakan bahwa pembangkit listrik batubara masih mendominasi kontribusi listrik diikuti oleh gas dan menjadi 83 % dari total kontribusi bahan bakar fosil. Sedangkan beberapa kontribusi berasal dari energi baru dan terbarukan (EBT) seperti PLTA 7%, panas bumi 5,6% dan biofuel 3,8%. Kontribusi energi baru dan terbarukan tersebut memberikan kontribusi sebesar 16,8 % dari total kontribusi EBT. Profil energi tahun 2021 telah mencapai 1103 kWh/kapita yang berasal dari konsumsi 87,5% PLN dan lainnya untuk non-PLN (MEMR, 2020).



**Gambar 95** Profil Ketenagalistrikan Nasional di Indonesia Juli 2021 (MEMR, 2020)

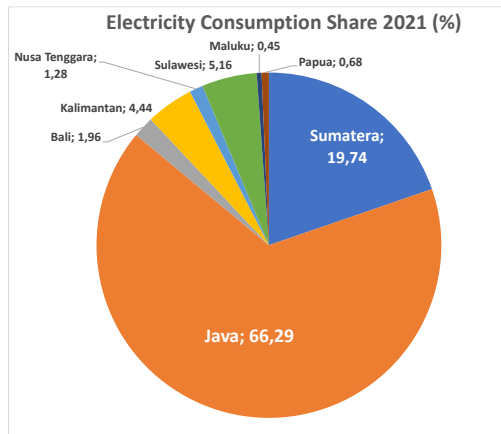
Seperti dapat diperkirakan oleh populasi terbesar di Indonesia serta beberapa layanan lain yang mengonsumsi listrik seperti industri, layanan publik dan sebagainya. Untuk tingkat konsumsi pulau, Jawa mengonsumsi listrik terbesar 176 TWh (2021) dan 186 TWh (2022) yang setara dengan lebih dari 66% pangsa kebutuhan listrik seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 96** dan **Gambar 97**. Selain itu, Pulau Sumatra mengonsumsi 52 TWh (2022) dan 55 TWh (2022) listrik yang setara dengan sekitar 20% pangsa kebutuhan listrik.

Kedua pulau Jawa dan Sumatra ditambahkan dalam konsumsi listrik akan menjadi sekitar 230 TWh (2021) yang setara dengan 86% kebutuhan listrik di Indonesia pulau-pulau lainnya mengonsumsi kurang dari 14% dari total listrik termasuk pulau kecil dan terpencil secara umum setiap provinsi memiliki pertumbuhan konsumsi listrik dan pertumbuhan rata-rata sekitar hampir 6% seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 98** (National Energy Council, 2021).

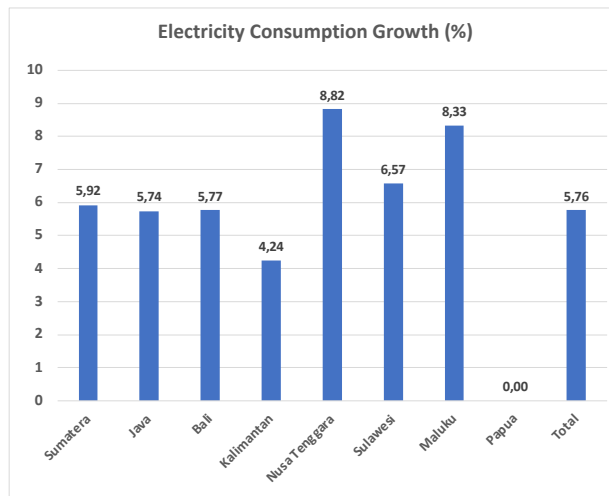


**Gambar 96** Konsumsi Listrik nasional Indonesia Setiap Pulau 2021 (National Energy Council, 2021)

Program Net Zero Emission (ZE) pada tahun 2060 telah dicanangkan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) sebagai program ambisius energi hijau masa depan di Indonesia yang memperkuat sumber energi hijau dari sumber energi baru dan terbarukan (EBT). yang akan dominan dan secara bertahap mengurangi kontribusi bahan bakar fosil sebelum tahun 2060 dan memberikan kontribusi sebagian dari energi nuklir pada tahun 2040 (Permana et al., 2022; Setiawan, 2021; Umah, 2021). Perubahan kerangka kebijakan pemerintah dapat dilihat sebagai pergeseran cara berpikir bahwa energi dapat dilihat sebagai dasar fundamental kekuatan nasional yang membawa pengelolaan sumber daya energi nasional harus tetap kuat, menuju pembangunan berkelanjutan untuk pertumbuhan ekonomi dan konektivitas untuk negara.



**Gambar 97** Persentase Konsumsi Listrik nasional Indonesia Setiap Pulau 2021 (National Energy Council, 2021)



**Gambar 98** Pertumbuhan Konsumsi Listrik Nasional dari 2021 ke 2022 (National Energy Council, 2021)

## 4.2 Permasalahan Implementasi PLTN

Bagaimana program pembangkit listrik tenaga nuklir dapat diimplementasikan di Indonesia dengan penerimaan yang tinggi dari masyarakat dan diterima oleh pembuat kebijakan dalam rencana energi nasional dan rencana pelaksanaan ketenagalistrikan. Kekhawatiran lainnya adalah bagaimana meningkatkan penerimaan publik terhadap program PLTN dan diterima oleh pemerintah kebijakan energi jangka panjang dalam KEN (Kebijakan Energi Nasional) atau Kebijakan Energi Nasional dan RUPTL



(Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik) atau rencana bisnis penyediaan tenaga listrik, sosialisasi program pendidikan dan pemahaman harus dilaksanakan secara efektif dengan melibatkan semua pemangku kepentingan. Menjamin keberlangsungan usaha utama PLTN di mana pemerintah dan masyarakat sebagai pemangku kepentingan mendapat arahan yang jelas sebagai sumber energi baru dan terbarukan yang dapat dipasok secara ramah lingkungan, handal (*security in supply*), aman dan terjangkau. Dengan mengadopsi analisis eksternal Analisis PESTEL yang terdiri atas aspek Politik, ekonomi, Sosial budaya, Teknologi, Lingkungan dan Hukum, beberapa poin penting akan dievaluasi.

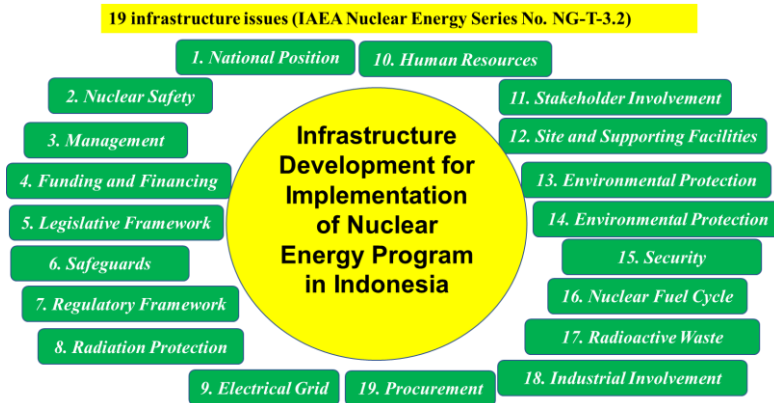
1. Aspek Politik : Pemerintah Indonesia memiliki *roadmap* dan Peraturan untuk mempercepat pengembangan EBT di Indonesia namun pengembangan PLTN belum tercantum dalam RUPTL 2019-2028 atau RUPTL terbaru saat ini dan PLTN dianggap sebagai yang terakhir pilihan sumber daya energi untuk pengembangan baru & ET, sebagaimana tercantum dalam PP 79/2014. Dalam rencana energi terbaru sebagai draf KEN dan RUPTL bahwa energi nuklir dimasukkan dalam bauran energi nasional dan pernyataan bahwa nuklir sebagai sumber daya terakhir atau alternatif terakhir harus dihilangkan untuk memenuhi pemerataan dan bauran energi untuk semua pendekatan.
2. Aspek terkait Ekonomi: Pemerintah Indonesia mempunyai komitmen kuat untuk mengurangi emisi gas rumah kaca sesuai COP21 (29% dengan usaha sendiri dan 41% dengan Kerja sama Internasional. Kebijakan implementasi melalui target EBT 23% di 2025 dan 31% pada 2050. Nuklir memiliki listrik yang stabil pasokan dengan biaya produksi Nuklir sekitar 6-8 Sen USD / kWh dan itu membawa beberapa penciptaan lapangan kerja. Suplai yang stabil dari PLTN sebagai pembangkit based load memberikan keamanan pasokan dan kestabilan sistem daya. Apabila Tax karbon dimasukan, nilai ekonomis PLTN akan semakin baik. Industri turunan akan bermunculan apabila ada PLTN baik terkait teknologi pendukung maupun industri lainnya serta jasa, bisnis dan aktivitas lainnya yang memerlukan Listrik.
3. Aspek Sosio-Budaya: Pasokan Listrik baik Nasional dan Regional yang aman dan stabil, dan dapat berkontribusi pada bauran energi nasional dengan listrik rendah karbon. Selain menciptakan lapangan kerja, pendidikan dan dukungan teknologi bagi masyarakat setempat sehingga

dapat meningkatkan pertumbuhan ekonomi dan PDB, tetapi masih ada ketakutan dan skeptisisme masyarakat terhadap PLTN.

4. Aspek teknologi dan juga pengembangannya: Teknologi untuk membangun Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir tersedia baik dari nasional dan/atau dunia. Teknologi baru Teknologi Reaktor Modular Kecil tersedia untuk Negara Kepulauan. Teknologi nuklir memiliki tingkat kematian yang sangat rendah akibat kecelakaan di pembangkit listrik. Selain itu, dalam beberapa proses membawa beberapa kurangnya studi kelayakan yang komprehensif & vendor yang andal untuk Konstruksi dan Instalasi Pengadaan Teknik. PLTN bersifat skalability daya bisa digunakan dari tipe reaktor besar di atas 700 Mwe (orde GWe), reaktor daya menengah 300-700 Mwe, reaktor daya kecil (SMR) kurang dari 300 Mwe dan reaktor mikro orde di bawah 10 MWe.
5. Aspek lingkungan: Pemerintah Indonesia (Pemerintah Indonesia) memiliki komitmen untuk mengurangi emisi gas berdasarkan Perjanjian Paris. Energi nuklir dengan EBT memiliki polutan udara dan emisi CO<sub>2</sub> yang sangat rendah dibandingkan sumber energi lainnya. Energi nuklir menggunakan sedikit area untuk pembangkit yang akan menghindari deforestasi atau penggunaan lahan yang lebih besar yang berakibat rendahnya tangkapan emisi gas polusi udara. Namun, beberapa ketakutan dan risiko pencemaran radiasi dan kewajiban pada pengelolaan limbah dan proses penonaktifan atau dekomisioning.
6. Aspek hukum: Dalam aspek hukum energi nuklir, diterbitkan Undang-Undang Dasar Energi Nuklir (UU Nuklir) yang dibentuk untuk menangani aturan pengelolaan dan keselamatan, namun Undang-Undang Energi Baru dan Terbarukan (RUU EBT) belum mencakup aspek Investasi Pembangkit Listrik dan perlu dikuatkan dan dikembangkan bahwa “UU Nuklir” masih belum mencerminkan standar pengembangan energi nuklir saat ini baik dari segi hukum maupun teknologi. Diharapkan PLTN komersial dan aplikasi ko-generasi dapat termasuk didalamperaturan baru terkait sehingga industri nuklir secara komersial bisa segera di implementasikan.

Analisis penyebab masalah akan sangat membantu untuk mengidentifikasi penyebab dari banyak masalah yang terjadi untuk membuat arah dan gerakan yang jelas. Bagian terpenting dalam implementasi energi nuklir adalah posisi pemerintah untuk “Go Nuclear” dan bersama pemangku

kepentingan lainnya membawa implementasi pernyataan nasional serta investasi untuk memperkuat program energi baru dan terbarukan untuk program emisi nol bersih. Selain itu, infrastruktur energi nuklir harus dievaluasi dan untuk mengidentifikasi dan menggambarkan situasi yang kompleks, berdasarkan dokumen energi nuklir IAEA, diperlukan 19 masalah infrastruktur dari posisi nasional hingga masalah pengadaan seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 99**.



**Gambar 99** Isu Infrastruktur dalam implementasi program nuklir Indonesia

Sebagai posisi pertama dan utama, peran posisi nasional begitu penting dan mendesak dan status itu sangat bergantung pada pemerintah pusat dalam bentuk *statement* dan dukungan untuk kegiatan tersebut. Berdasarkan Perpres Nomor 5 Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional, dan Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2007 tentang Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional Tahun 2005-2025, Indonesia telah siap menerjunkan pelaksanaan program tenaga nuklir sebagai bagian dari posisi nasional (Departemen Energi dan Sumberdaya Mineral, 2005). Selain itu, pengumuman dewan energi nasional baru-baru ini juga akan memperkuat posisi nasional untuk program energi nuklir. Untuk masalah keamanan nuklir, disebutkan dalam Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2007 tentang Program Pembangunan Jangka Panjang Nasional bahwa untuk melaksanakan program energi nuklir harus dalam kondisi aman. Untuk memperkuat aspek keselamatan beberapa peraturan lain telah dibuat dan dilaksanakan seperti Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997 tentang Tenaga Nuklir, tentang badan pengawas tenaga nuklir dan beberapa peraturan lain yang terkait dengan tenaga nuklir (*Undang-Undang Republik Indonesia No. 10 Tahun 1997 Tentang Ketenaga Nukliran*, 1997).

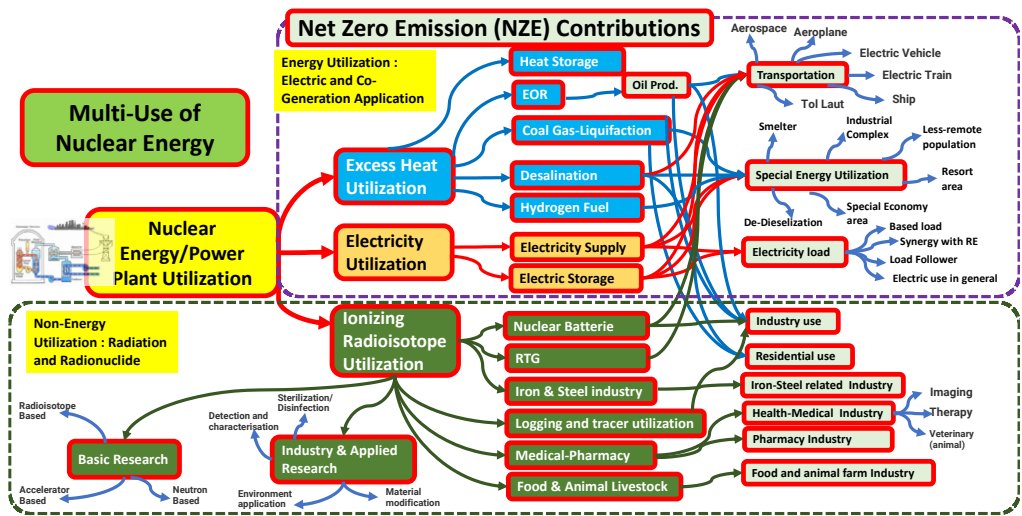
Mengenai masalah manajemen, program PLTN di Indonesia ditentukan oleh skema pembiayaan seperti yang dapat dikelola oleh perusahaan negara, atau oleh perusahaan swasta atau beberapa korporasi lainnya. Misalnya, Badan Usaha Milik Negara (BUMN) akan menjadi Pemilik PLTN atau dapat menjadi Perusahaan Listrik Negara (PT. PLN) akan bertindak sebagai utilitas. Masalah pendanaan dapat merupakan kombinasi dari pinjaman jangka panjang dan ekuitas serta risiko keuangan NPP harus dievaluasi seperti proses penundaan dan pembengkakan biaya selama proses pembangunan dan konstruksi. Tentang masalah kerangka kerja legislatif, itu akan bekerja sama dengan pemerintah atau posisi nasional di bawah peraturan nuklir termasuk Sistem Nasional Kesiapsiagaan dan Tanggap Darurat dan Peraturan Pemerintah tentang Keselamatan dan Keamanan Instalasi dan Material Nuklir. Masalah pengamanan akan diterapkan dan dilaksanakan melalui sistem akuntansi dan pengendalian Bahan Nuklir dengan dievaluasi dan dipantau secara berkala. Masalah korelasi lainnya seperti protokol tambahan telah dilaksanakan melalui koordinasi antara BAPETEN dan instansi terkait. Dalam kerangka regulasi, Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997 telah menyatakan bahwa pengendalian pemanfaatan tenaga nuklir dilakukan oleh Badan Pengawas (BAPETEN) melalui peraturan, perizinan, dan inspeksi. Tentang masalah proteksi radiasi, Program dan penilaian ini telah dilakukan berdasarkan standar keselamatan IAEA, seperti untuk pengoperasian reaktor daya, persyaratan keselamatan nuklir, aspek proteksi radiasi untuk Desain PLTN; Transportasi Bahan Bakar; Pengelolaan dan penyimpanan limbah; Penonaktifan.

Masalah jaringan listrik harus dihubungkan dengan jaringan listrik yang ada dan yang akan datang seperti jaringan nasional sistem Jawa-Madura-Bali yang dapat mencakup aliran daya, stabilitas transien, dan sistem jaringan. Isu lain seperti Sumber Daya Manusia, Pelibatan Pemangku Kepentingan, Perlindungan Lingkungan, Perencanaan Darurat, Keamanan, Siklus Bahan Bakar Nuklir, Limbah Radioaktif, Pelibatan Industri harus dilaksanakan secara bertahap dan serentak. Masalah terakhir adalah pengadaan. Ini juga merupakan masalah yang sangat penting yang dapat dibentuk oleh Tim Pengadaan khusus oleh pemerintah. Menurut Keputusan Presiden No. 80 Tahun 2003 yang meliputi pengadaan barang dan jasa oleh perusahaan swasta. Oleh karena itu, tidak menutup kemungkinan pengadaan barang-barang tersebut akan dilaksanakan oleh pihak swasta. Semua pemangku

kepentingan dapat berpartisipasi untuk merangkul industri nasional dalam program energi nuklir yang dapat memberikan dukungan yang baik untuk konstruksi dan layanan seperti pembangkit listrik konvensional saat ini. Mengacu pada target analisis implementasi program nuklir nasional di Indonesia, diperlukan penekanan pada kepastian keberlangsungan kebijakan dan implementasi pemanfaatan pembangkit listrik tenaga nuklir dengan harapan pemerintah dan masyarakat sebagai pemangku kepentingan, mendapat arahan yang jelas sebagai sumber energi baru dan terbarukan yang dapat disuplai secara bersih dan ramah lingkungan, ramah, handal (keamanan dalam suplai energi), aman, dan terjangkau.

### 4.3 Pemanfaatan Energi Nuklir

Metode *rich picture* atau gambar kaya dapat diadopsi untuk melakukan evaluasi dalam rangka mengkomunikasikan konsep dan ide, orang menggunakan gambar dalam banyak cara dan gambar (Archibald & Gerber, 2018; Bell & Morse, 2013; Conte & Davidson, 2020; Strangeways & Papatraianou, 2019) yang memberikan arahan sekaligus peta visual untuk menggambarkan secara kualitatif suatu sistem dan korelasinya. Pada analisis ini, pendekatan *rich picture* digunakan untuk mengidentifikasi profil atau peta pemanfaatan energi nuklir dan beberapa multiproduksi pemanfaatan energi nuklir seperti pada **Gambar 100**. Hal ini menunjukkan bahwa pemanfaatan energi nuklir akan mencakup beberapa aspek di antaranya energi berkelanjutan yang terdiri atas aspek lingkungan, aspek sosial dan aspek ekonomi yang akan menjadi salah satu pertimbangan penting untuk mengadopsi program energi berkelanjutan yang sesuai dengan tujuan SDG'S. Aspek lain dari pemanfaatan energi nuklir adalah pemanfaatan energi secara khusus dan spesifik serta aspek multiguna energi yang dapat menyediakan produksi listrik dan produksi non-listrik, atau ko-generasi energi seperti produksi hidrogen, desalinasi, gasifikasi dan liquifaksi batu bara dan lainnya. Energi nuklir juga bisa mensuplai fasilitas smelter, program de-dieselsiasi, listrik untuk kompleks industri serta beberapa fasilitas penyimpanan kelebihan daya yang dihasilkan dari pembangkit listrik tenaga nuklir.



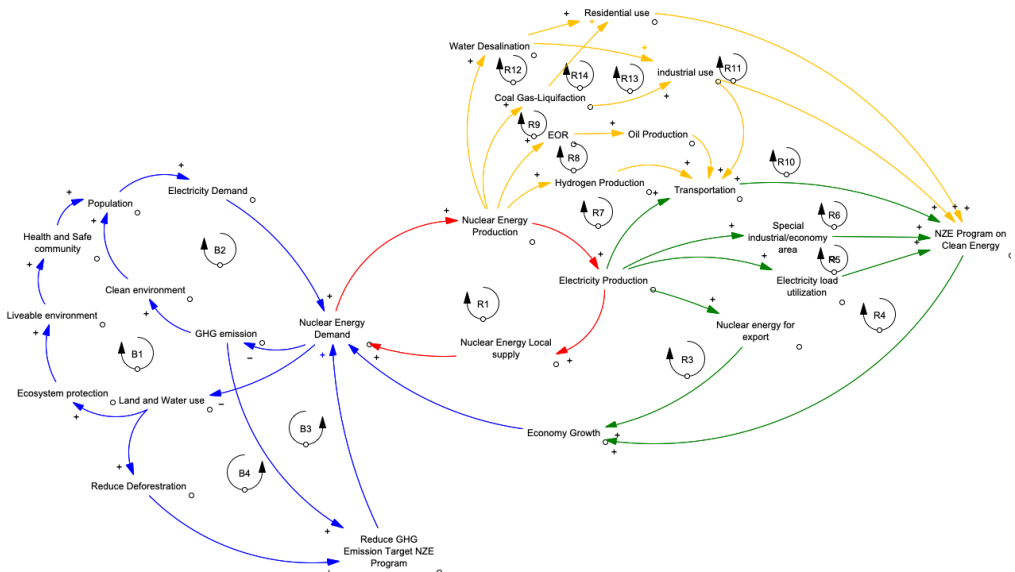
Gambar 79 Multipemanfaatan energi nuklir

Nuklir memiliki kemampuan energi kinerja terbaik sebagai sumber energi teraman dan terbersih berdasarkan data statistik selama operasi reaktor hingga saat ini dibandingkan dengan sumber energi lainnya (Ritchie & Roser, 2020b). Ini juga menyediakan pasokan listrik yang stabil dan memberikan produksi yang aman 24 jam dengan operasi 4 minggu sebulan dan sepanjang hari dalam setahun. Kapasitas daya dapat disesuaikan dengan permintaan dan daya juga terukur tergantung pada permintaan daya dan bebannya. Dalam hal penghasil listrik, karena faktor kapasitas tertinggi yang lebih dari 90%, nuklir menjadi penghasil listrik beban dasar terbesar. Pada beberapa reaktor terutama untuk reaktor kecil dan modular atau reaktor daya sangat kecil dapat digunakan sebagai pembangkit listrik yang mengikuti beban yang dapat disesuaikan dengan fluktuasi permintaan dan untuk disinergikan dengan energi terbarukan yang memiliki karakteristik *intermittency* yang memungkinkan terjadinya fluktuasi daya.

**Gambar 101** menunjukkan pemanfaatan energi dalam rangka keseluruhan target program NZE. Program tersebut akan terdiri atas target NZE pada kebutuhan listrik, target NZE dari permintaan atau pemanfaatan non-listrik, target NZE pada target pengurangan GRK serta target Perlindungan Lingkungan dalam program NZE. Target khusus tersebut akan dicakup oleh aspek individu yang terutama terkait erat dengan masing-masing target. Target ZNE menunjukkan beberapa target kegiatan berdasarkan permintaan listrik, target NZE dari permintaan atau

pemanfaatan non-listrik, target NZE pada target pengurangan GRK serta target Perlindungan Lingkungan sebagai bagian dari pengurangan emisi karbon dan pemanfaatan energi rendah karbon.

Target khusus berfokus pada program NZE tentang Energi Bersih yang berbasis energi untuk keperluan rumah tangga, keperluan industri, transportasi, kawasan industri atau ekonomi khusus serta dari pemanfaatan beban listrik. Program energi bersih NZE harus mendorong pertumbuhan ekonomi dan akan mendorong listrik atau konsumsi energi per kapita. Dengan demikian akan membutuhkan lebih banyak energi dalam hal ini kebutuhan energi nuklir menjadi lebih tinggi dan meningkat. Sisi lain dari aspek emisi Gas Rumah Kaca (GRK) dan penggunaan lahan dan penggunaan air berdasarkan aktivitas energi sebagai bagian dari program pengurangan efek terhadap lingkungan. Ketika program Pengurangan emisi karbon lebih baik, secara otomatis akan meningkatkan permintaan energi menjadi lebih tinggi dan saat bersamaan ekosistem energi menjadi lebih ramah lingkungan. Selain itu, sisi penguatan juga berasal dari sisi pemanfaatan seperti transportasi, industri khusus atau kawasan ekonomi, pemanfaatan beban listrik secara umum serta energi nuklir untuk ekspor.



**Gambar 101** Kontribusi Program Energi Nuklir

Di pusat juga untuk produksi energi, pasokan lokal dan permintaan energi pemanfaatan nuklir ditunjukkan dengan loop penguatan. Sedangkan loop

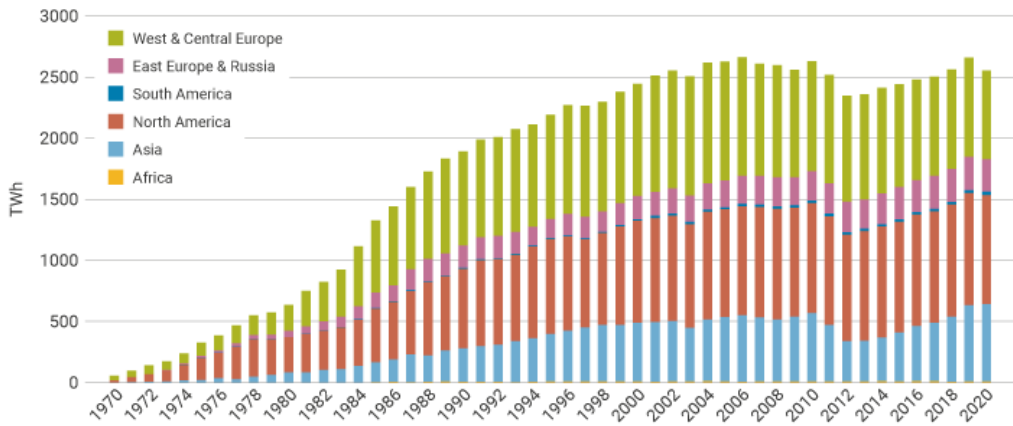
penyeimbang berasal dari aspek pengurangan GRK untuk mengontrol aktivitas produksi energi seperti loop penyeimbangan aspek emisi GRK, tata guna lahan dan tata guna air serta dampaknya terhadap pengurangan deforestasi dan peningkatan jumlah penduduk dan kebutuhan listrik. Permintaan energi nuklir akan meningkat karena permintaan listrik dari peningkatan jumlah penduduk serta pertumbuhan ekonomi dan peningkatan pasokan untuk lokal dan ekspor. Populasi akan bertambah seiring berjalannya waktu bukan hanya karena laju pertumbuhan kelahiran dan laju kematian yang semakin berkurang, tetapi juga masyarakat semakin meningkat dari segi kesehatan dan keselamatan serta lingkungan hidup karena ekosistem terjaga.

#### **4.4 Analisis Keunggulan Kompetitif Energi Nuklir**

Analisis keunggulan kompetitif atau *competitive advantages* dari energi nuklir dilakukan untuk menunjukkan daya saing utama energi nuklir, membandingkan serta bersinergi dengan produksi energi lainnya. Beberapa aspek keunggulan kompetitif yang diadopsi digunakan untuk analisis termasuk:

1. Analisis Keunggulan Kompetitif Energi Nuklir akan dilakukan untuk menunjukkan keunggulan dengan mengadopsi energi nuklir sebagai sumber energi dan beberapa fitur menarik lainnya dan dapat dibandingkan dengan sumber energi lainnya.
2. Evaluasi berdasarkan program net zero emission yang difokuskan pada kontribusi program NPP dan program terkait serta kemampuan teknologinya
3. Analisis Daya Saing Ekonomi PLTN dengan menggunakan metodologi *levelized cost of electrical* (LCOE) untuk biaya dasar produksi listrik dari pembangkit listrik.
4. Evaluasi berdasarkan strategi pemetaan skala kapasitas listrik PLTN untuk kebutuhan listrik di Indonesia dan beberapa aplikasi PLTN kogenerasi lainnya.
5. Analisis dan pemetaan pemanfaatan PLTN untuk tujuan khusus ekonomi khusus atau kawasan industri dan program de-dieselisasi yang merupakan sebagian dari program proyek nasional untuk elektrifikasi daerah terpencil dan zona terisolasi serta untuk memenuhi kebutuhan listrik di kawasan industri khusus di Indonesia.





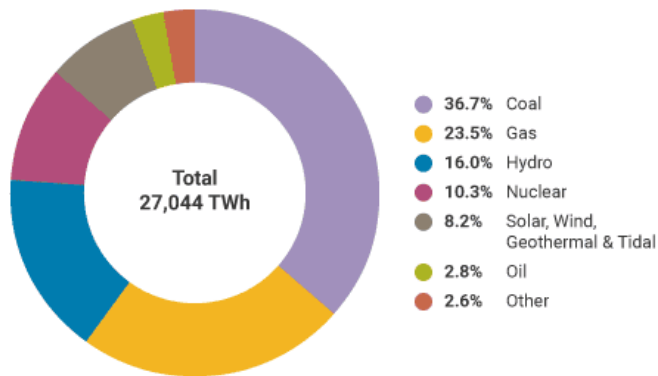
**Gambar 80** Produksi Listrik Nuklir (Sumber: World Nuclear Association, IAEA PRIS) (World Nuclear Association, 2022b)

#### 4.4.1 Program Energi Nuklir Dunia

Semenjak program *Nuclear for Peace* atau nuklir untuk tujuan damai, pemanfaatan energi nuklir berupa Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) telah dimulai di dunia yang pertama kali dioperasikan di Kota Obninsk, negara Rusia pada tahun 1954 (Permana et al., 2021). Dalam pemanfaatan energi global, pembangkit listrik tenaga nuklir memberikan beberapa peluang dan kontribusi yang bermanfaat bagi bauran energi nasional termasuk sektor energi maupun sektor non-energi. Tenaga nuklir sipil saat ini telah mengoperasikan lebih dari 18.000 tahun pengalaman reaktor. Pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) saat ini telah digunakan di 32 negara dari seluruh kawasan Asia, Afrika, Amerika, dan Eropa serta dari negara berkembang dan maju seperti terlihat pada **Gambar 102**. Sekitar 440 unit PLTN beroperasi yang menghasilkan 2553 TWh dan setara dengan sekitar 10% produksi listrik dunia (26.730 TWh) dan pada tahun 2021 meningkat menjadi 2653 TWh seperti terlihat pada **Gambar 103**. Selain itu, sekitar 55 unit unit pembangkit listrik tenaga nuklir sedang dibangun di 15 negara yang setara dengan 15% dari kapasitas yang ada (World Nuclear Association, 2022b).

Sebagai negara besar, Negara Bagian Amerika (USA) menghasilkan listrik terbesar dari PLTN yang secara nominal penggunaan tenaga listrik dari PLTN terbesar di dunia. Kemudian diikuti dengan pemanfaatan PLTN terbesar kedua yaitu Cina, selanjutnya diikuti Perancis dan seterusnya. Negara berkembang terbaru yang memanfaatkan PLTN adalah Uni Emirat Arab (UEA) (World Nuclear Association, 2022b). Negara-negara tersebut

menganggap PLTN sebagai program energinya karena nuklir sebagai salah satu sumber energi yang bersih, aman, dan berumur panjang. Alasan tersebut juga lebih diutamakan bagi Indonesia sebagai negara besar dan negara kepulauan sebagai negara dengan jumlah penduduk terbesar ke-4 di dunia, negara berkembang, dan perekonomian yang semakin meningkat dengan mengadopsi sumber energi yang cukup untuk mendukung pembangunan nasional dengan sumber energi yang ramah lingkungan.



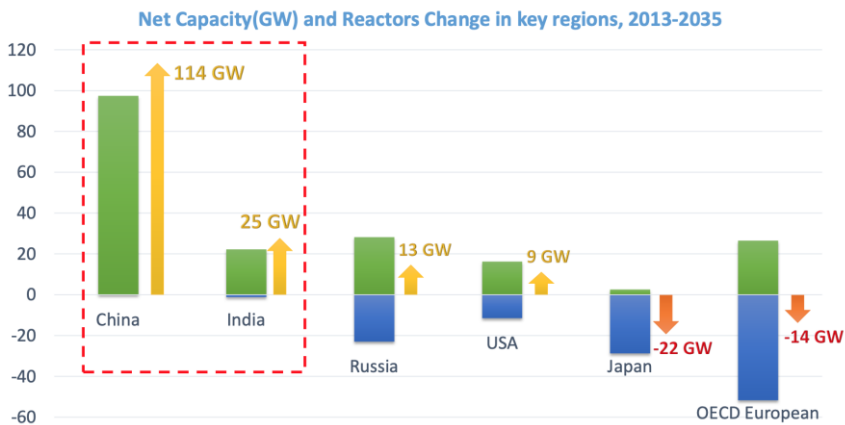
Source: IEA

**Gambar 81** Produksi Listrik Dunia Berdasarkan Sumber 2019 (Sumber International Energy Agency) (World Nuclear Association, 2022b)

Pemanfaatan energi nuklir telah digunakan tidak hanya untuk penggunaan energi tetapi juga untuk aplikasi non-energi. Dalam hal aplikasi energi yang didasarkan pada panas yang dihasilkan dari reaktor yang dapat digunakan untuk menghasilkan turbin untuk produksi listrik serta aplikasi kogenerasi. Sistem kogenerasi berasal dari panas berlebih dari reaktor yang dapat digunakan untuk desalinasi air, produksi hidrogen, untuk aplikasi gasifikasi dan pencairan batu bara dan aplikasi pemulihan minyak yang disempurnakan (EOR) (IAEA, 2017; Reyes & Hopkins, 2018; World Nuclear Association, 2021). Bisnis energi PLTN dapat menggerakkan perekonomian negara terutama dengan menghasilkan listrik yang cukup untuk memenuhi kebutuhan industri dan jasa lainnya. Usaha lain yang terkait dengan energi nuklir adalah aplikasi non energi untuk kesehatan dan obat-obatan, farmasi, baterai nuklir, industri logam, lingkungan pertanian, peternakan, dan sebagainya berdasarkan pemanfaatan radioisotop. Aplikasi ini untuk aplikasi farmasi medis dan radio yang membutuhkan aplikasi nuklir berdasarkan pemanfaatan radioisotop yang dihasilkan dari reaktor (Bezdek, 2021).

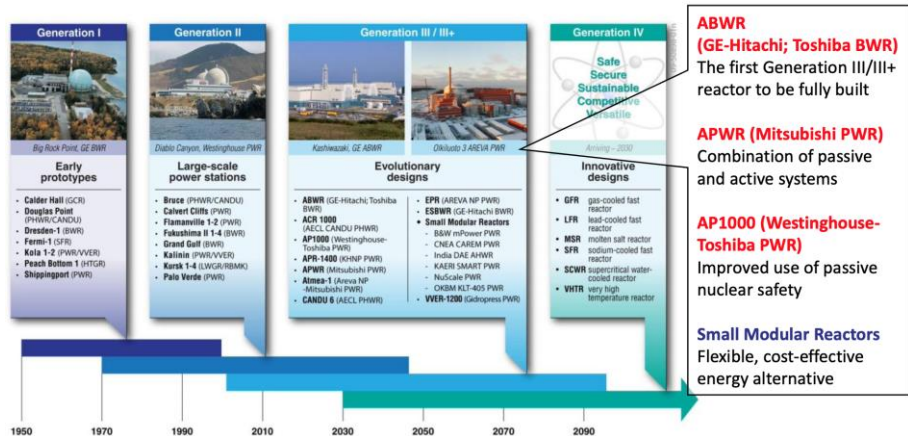
#### 4.4.2 Kemajuan Teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)

Pembangkit listrik tenaga nuklir telah dioperasikan sejak tahun 1951 hingga saat ini untuk berbagai negara OECD dan non-OECD untuk menggerakkan ekonomi dan ketahanan energi bagi bangsa. Pemanfaatan PLTN semakin meningkat terutama di kawasan Asia seperti Cina dan India diikuti oleh Rusia dan Amerika Serikat seperti ditunjukkan pada **Gambar 104** yang menunjukkan Kapasitas Bersih [GW] dan produksi daya Reaktor, 2013-2035.



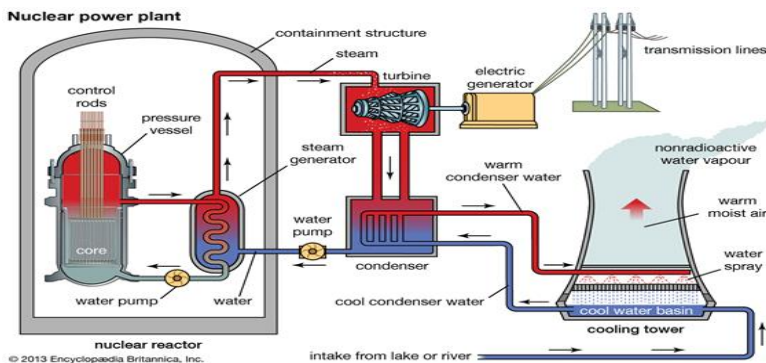
**Gambar 82** Total Kapasitas Bersih [GW] dan Produksi Daya Reaktor, **2013-2035** (IEA, 2013; Sasakawa Peace Foundation USA, 2015)

Teknologi reaktor nuklir telah dikembangkan dan memiliki strategi kemajuan untuk mengoptimalkan kemampuan dan pemanfaatannya sejak reaktor prototipe awal sebagai reaktor tipe generasi 1, reaktor generasi 2, hingga reaktor generasi IV yang dapat disebut reaktor nuklir inovatif di era ini. Dalam teknologi komersial dan teruji di seluruh dunia saat ini, kontributor utama produksi listrik berasal dari PLTN generasi 2 dan generasi 3 dan 3+ sebagai jenis reaktor lanjutan khususnya teknologi berbasis reaktor air ringan seperti terlihat pada **Gambar 105**. Konsep dasar teknologi berbasis Tenaga Nuklir Pembangkit didasarkan pada pembangkit listrik termal. Pembangkit listrik ini menghasilkan panas dari reaktor nuklir yang menggunakan reaksi fisi nuklir.



Gambar 83 Perkembangan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) (GIF, 2021; IEA, 2013)

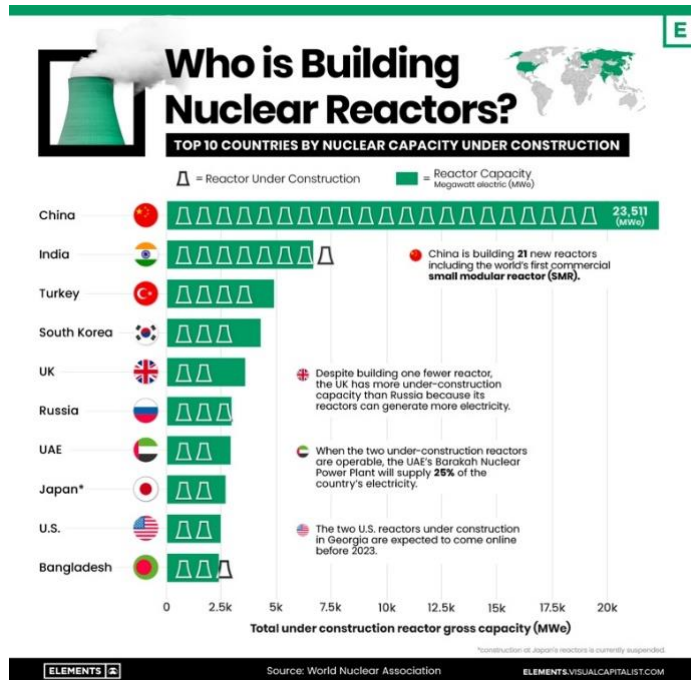
Ada beberapa kata kunci untuk menjelaskan proses di mana komponen utama pembangkit listrik berbasis reaktor, air sebagai pendingin, Turbin yang digerakkan oleh uap dan untuk menghasilkan listrik dengan generator tanpa produksi gas hijau seperti NO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, Debu seperti terlihat pada Gambar 106. Bahan bakar sangat efisien dan densitas tinggi yaitu 30 ton uranium untuk 1GW, setara dengan 4 juta ton batu bara untuk bahan bakar fosil.



Gambar 84 Proses Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) (Encyclopedia Britannica inc, 2022)

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 107, terdapat beberapa negara dalam sepuluh besar negara yang beberapa kemajuan membangun beberapa reaktor nuklir baru seperti Cina, India, dan sebagainya. Ini menunjukkan bahwa sebagian besar reaktor nuklir baru sedang dibangun di Asia seperti Cina dan India. Sebagai negara yang memiliki program energi yang sangat ambisius, ketertarikan Cina pada tenaga nuklir dan mereka mencoba

untuk meningkatkan pertumbuhan ekonomi mereka dan mencoba melakukan transisi pasokan energi dengan mengurangi konsumsi energi batu bara dengan memiliki 21 reaktor yang sedang dibangun. Cina berupaya memperluas kapasitas energi nuklirnya hingga mencapai lebih dari 40% bauran energi nuklir sebelum tahun 2030.

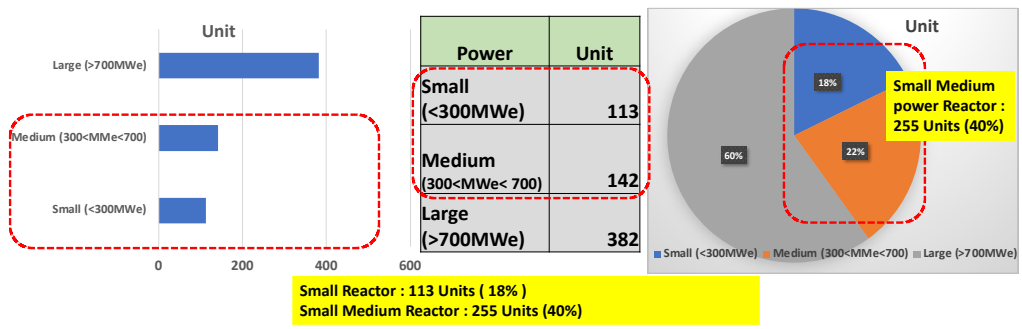


**Gambar 85** 10 Negara Teratas Yang Sedang membangun Reaktor Nuklir Baru (Bhutada, 2022)

Pada saat yang sama, Cina juga sedang membangun reaktor modular kecil (SMR) komersial pertama di dunia, yang dapat memberi daya lebih dari 500.000 rumah tangga setiap tahunnya. India memiliki delapan reaktor yang sedang dibangun dan benua Asia lainnya (ex-Rusia) memiliki 36 yang sedang dibangun, sementara Turki mencoba membangun empat reaktor nuklir dan berharap reaktor operasional pertama akan beroperasi pada tahun 2023. Selain di negara Eropa, Inggris juga memiliki reaktor terbesar yang sedang dibangun dengan kapasitas bruto masing-masing 1.720 MWe. Dengan meningkatnya permintaan energi di dunia dan mengharapkan semakin banyak pemanfaatan energi nuklir, hal ini dapat mengubah reaktor yang sedang dibangun untuk beberapa ratus reaktor yang direncanakan di seluruh dunia.

### 4.4.3 Teknologi Reaktor Kecil Modular (*Small Modular Reactors/SMR*)

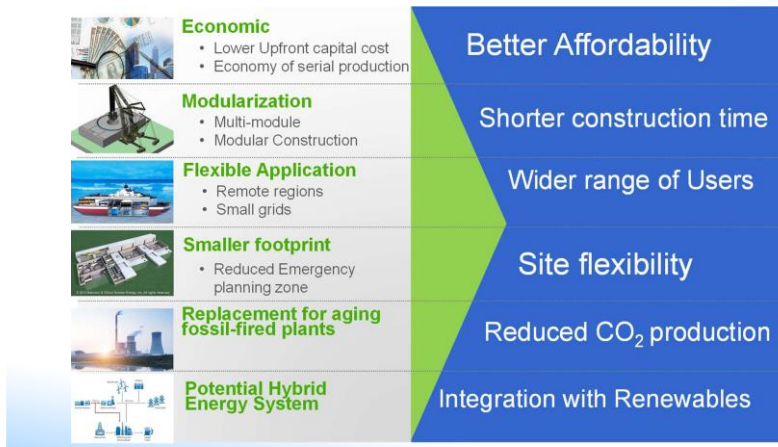
Selain komersialisasi PLTN untuk daya pembangkit yang besar, sepanjang Sejarah PLTN dan dalam dekade saat ini perkembangan Pembangunan dan inovasi teknologi terkait reaktor berukuran kecil dan menengah atau modular (SMR) telah menyita Masyarakat global. Teknologi pembangkit SMR merupakan pilihan teknologi yang cukup strategis dan inovatif dalam rangka memenuhi kebutuhan pembangkit listrik yang fleksibel untuk rentang pengguna dan aplikasi yang lebih luas terutama untuk beban yang lebih kecil dan infrastruktur yang belum lengkap seperti untuk kepulauan, industri terisolasi dari jaringan Listrik dan lainnya. SMR dapat digunakan sebagai pembangkit tunggal atau multi-modul, dan berpotensi untuk system hibrida atau campuran dengan sumber energi alternatif lainnya, seperti energi terbarukan. Dalam rentang daya keluaran dari pembangkit khususnya PLTN, IAEA mengklasifikasikan reaktor menurut keluaran listriknya sebagai berikut: kurang dari 300 MWe sebagai reaktor kecil (SMR), 300 MWe - 700 MWe sebagai reaktor daya sedang atau medium dan reactor dengan daya keluaran lebih besar dari 700 MWe sebagai reaktor besar.



**Gambar 108** Unit PLTN Daya Kecil ke Besar (Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC), 2016; IAEA, 2016; IEA, 2022; Kupitz, 2000)

## SMR: Rationale of developments

A nuclear option to meet the need for flexible power generation for wider range of users and applications








**Gambar 86** Keunggulan Kompetitif SMR (Subki, 2018)

Selama tahun 1960-an dan awal 1970-an, pembangkit listrik tenaga nuklir yang memasuki layanan didominasi oleh pembangkit dengan keluaran yang masuk dalam rentang ukuran reaktor kecil (kurang dari 150 MWe) dan menengah (300 MWe hingga 700 MWe). Selama akhir 1970-an dan 1980-an, keseimbangan bergeser ke pembangkit berukuran besar (900 MWe hingga 1400 MWe), karena pembangkit listrik tenaga nuklir memasuki layanan, terutama untuk melayani kebutuhan negara-negara industri seperti AS, Jepang, Jerman, dan Prancis. Reaktor kecil telah digunakan di seluruh dunia sebanyak 113 unit (18%) dan reaktor daya menengah sebanyak 142 unit (22%) seperti terlihat pada **Gambar 108**. Mengadopsi teknologi canggih SMR seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 109**, bahwa beberapa keunggulan kompetitif sejalan dengan teknologi ini seperti keterjangkauan yang lebih baik dari segi ekonomi, untuk waktu konstruksi dapat dilakukan dalam waktu yang lebih singkat karena konsep modularitas.

Options for Archipelagic Countries	
<b>Programme #1:</b>	<b>Land-based on-grid province (First Concrete Date: 2023 – 2028)</b>
Type of Technology	Water-cooled reactors, proven design, licensed / under-construction or in-operation in the country of origin, experienced builder, reference plants
Power range / modes	2 x 100 MWe or 4 x 60 MWe, baseload and load-follows
Target applications	Eliminate import of electricity, synergetic with fossils and renewables
<b>Programme #2:</b>	<b>Small islands, remote regions (FCD: 2025 – 2030)</b>
Type of Technology	Microreactors: high-temperature gas-cooled, molten-salt reactors
Power range / modes	(5 – 10) MWe, baseload
Target applications	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduce dependency on diesel fuel,</li> <li>Cogeneration of electricity and industrial process heat</li> </ul>
<b>Programme #3:</b>	<b>Marine-based and floating power unit (2028 – 2033)</b>
Type of Technology	<ul style="list-style-type: none"> <li>Compact PWRs for floating power unit and molten-salt reactors (<i>R&amp;D stage</i>)</li> <li>Capacity building with national ship industries</li> </ul>
Power range / modes	(5 – 50) MWe, baseload
Target applications	Power supply for offshore oil/gas platform

Gambar 87 Beberapa skenario untuk negara-negara kepulauan (Subki, 2018)

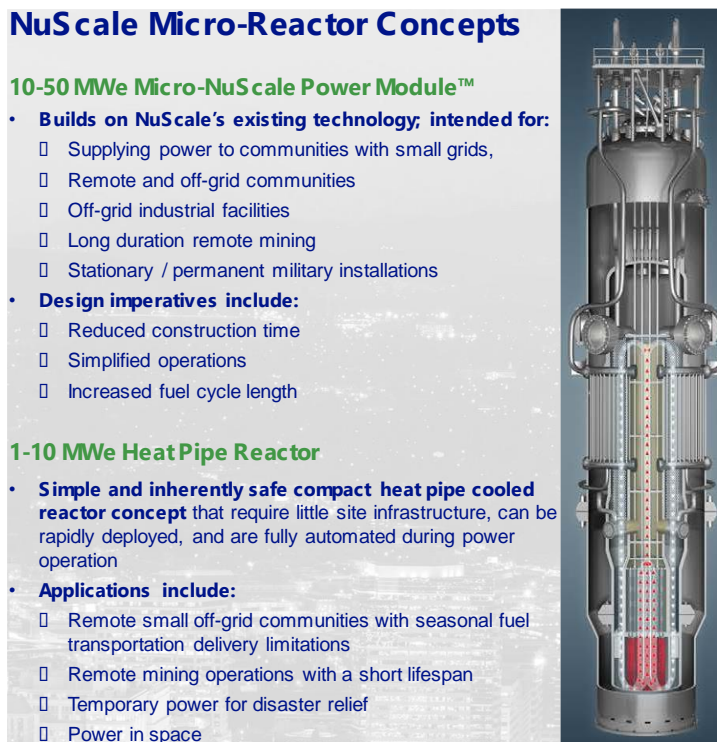
Land-based SMRs (Examples)				
CAREM	ACP100	RITM-200	SMART	NuScale
				
<b>Design Status:</b> Advanced stage of construction in Atucha site, Argentina	<b>Design Status:</b> Detailed design; received license for construction in July 2019	<b>Design Status:</b> 6 prototype reactors installed on icebreakers (2 are in the process of testing) Land-based version available for deployment	<b>Design Status:</b> Design Certification review completion in 2020, to start construction in 2023	<b>Design Status:</b> Standard Design Approval received in July 2012, Pre-Project Engineering completed
<ul style="list-style-type: none"> <li>CNEA, Argentina</li> <li>Integral-PWR</li> <li>100 MWt / 30 MWe</li> <li>Natural Circulation</li> <li>Core Outlet Temp: 326°C</li> <li>Enrichment: 3.1% (prototype)</li> <li>Refuel interval: 14 months (prototype)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>CNNC, China</li> <li>Integral-PWR</li> <li>385 MWt / 125 MWe</li> <li>Forced circulation</li> <li>Core Outlet Temp: 319.5°C</li> <li>Enrichment: &lt;4.95%</li> <li>Refuel interval: 24 months</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>OKBM Afrikantov, Russian Federation</li> <li>Integral-PWR</li> <li>175 MWt / 50 MWe per module</li> <li>Core Outlet Temp: 318°C</li> <li>Enrichment: &lt;20%</li> <li>Refuel interval: Up to 120 months</li> <li>Without onsite refuelling</li> <li>Spent fuel take back</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>NuScale Power, LLC, United States of America</li> <li>Integral-PWR</li> <li>Natural Circulation</li> <li>200 MWt / 60 MWe per module x 12 Modules</li> <li>Core Outlet Temp: 321°C</li> <li>Enrichment &lt; 4.95%</li> <li>Refuel interval: 24 months</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Joint Design of KAERI, Republic of Korea with K.A.CARE, Saudi Arabia</li> <li>Integral-PWR</li> <li>365 MWt / 107 MWe per module</li> <li>Core Outlet Temp: 322°C</li> <li>Enrichment: &lt;5%</li> <li>Refuel interval: 30 months</li> <li>For cogeneration</li> </ul>

Gambar 88 Beberapa teknologi SMR Land Based (Darat)(Subki, 2018)

Bagi pengguna, teknologi ini dapat digunakan dalam jangkauan pemanfaatan yang lebih luas karena penerapannya yang fleksibel untuk daerah terpencil maupun untuk jaringan kecil. Untuk lokasi konstruksi, karena daya yang kecil, diperlukan tapak yang jauh lebih kecil sehingga fleksibilitas lokasi dapat diperoleh untuk mengurangi zona perencanaan darurat. Sebagai fitur PLTN umum, ini juga dapat digunakan untuk mengurangi produksi CO2 untuk menggantikan penuaan pembangkit



berbahan bakar fosil dan pembangkit listrik tenaga diesel di daerah terpencil dan terisolasi. Sebagai bagian dari fleksibilitas PLTN, dapat diintegrasikan dengan sistem terbarukan sebagai sistem energi hibrida dan beberapa pembangkit listrik pengikat beban. Beberapa skenario dapat diterapkan untuk teknologi SMR untuk negara kepulauan seperti Indonesia yang bergantung pada wilayah dan kebutuhan listrik seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 110**.



**Gambar 89** Konsep Reaktor Mikro NuScale (Langdon, 2019)

Untuk teknologi SMR alternatif, dapat digunakan beberapa teknologi SMR seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 111** untuk tipe reaktor *land based* atau PLTN yang dibangun di darat. Untuk keluaran daya yang lebih kecil sebagai reaktor mikro dapat diadopsi konsep mikroreaktor NuScale untuk 1-10 MWe dan 10-50 MWe untuk keperluan khusus dengan kebutuhan listrik yang kecil seperti ditunjukkan pada **Gambar 112**. Dengan skalabilitas SMR dengan daya kecil dan mikro, dapat secara fleksibel mensuplai listrik untuk area dengan beban kecil dan untuk fasilitas beban yang terisolir baik untuk unit Tunggal atau unit pembangkit yang banyak. Aplikasi pemanfaatannya bisa digunakan

untuk Listrik dan ko-generasi seperti desalinasi, produksi hidrogen dan lainnya.

#### 4.4.4 Keuntungan Psaokan Daya Energi Nuklir

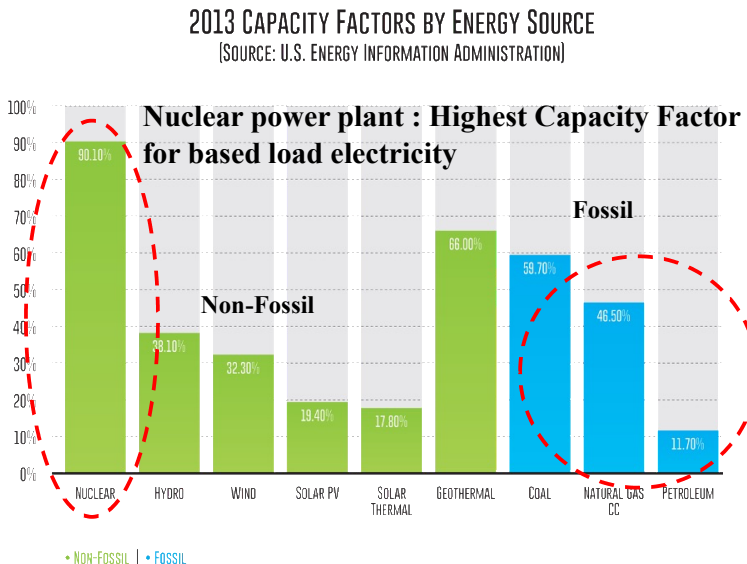
Sebagaimana disebutkan dalam tujuan kajian bahwa untuk menjamin keberlangsungan bisnis utama PLTN di mana pemerintah dan masyarakat sebagai pemangku kepentingan, mendapat arahan yang jelas sebagai sumber energi baru dan terbarukan yang dapat disuplai secara bersih dan ramah lingkungan, andal (*security in supply*), aman dan terjangkau. Sejalan dengan pernyataan dari pemerintah bahwa untuk menjamin keseimbangan antara pasokan dan kebutuhan listrik di dalam negeri, pemerintah Indonesia mengadopsi filosofi prinsip 5K (Kecukupan, Keandalan, Keberlanjutan, Keterjangkauan, dan Keadilan) sebagai prinsip Kecukupan atau Keadilan. Memadai, Andal, Berkelanjutan, Terjangkau, dan Berkeadilan (SRSAE). Tujuan Analisis dan filosofi 5K akan sejalan dengan keunggulan kompetitif pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 113**. Beberapa keunggulan kompetitif energi nuklir ditunjukkan berdasarkan karakteristik beban listrik, permintaan energi dan konektivitas jaringan listrik , skalabilitas kapasitas daya, multiguna penghasil energi, aspek keamanan pasokan, pembangkit listrik yang stabil dan fleksibel serta aspek lingkungan, ekonomi, dan keberlanjutan energi.

Nuclear Power Plant Utilization		
<b>1. Based load characteristics</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Full based load as backbone electricity supply for medium and large reactor</li> <li>• Medium load which can be combined with other based load energy producer for medium and large reactor</li> <li>• Load follower can be adopted for small and very small reactor power</li> </ul>	<b>2. Energy Demand and grid connectivity</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Medium and High energy demand areas or population → For medium and large power reactors</li> <li>• Grid and non-grid connection</li> <li>• Remote area or isolated area</li> <li>• Less energy demand</li> </ul>	<b>3. Power Capacity Scale</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Large power reactor → more than 700 MWe power reactors</li> <li>• Medium power reactor → From 300 MWe up to 700 MWe</li> <li>• Small power reactor → from 10 MWe up to less than 300 MWe</li> <li>• Very Small power reactor → less than 10 MWe</li> </ul>
<b>4. Multi Purposes Energy Producer</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Electricity production</li> <li>• Heat production</li> <li>• Desalination</li> <li>• Hydrogen production</li> <li>• Smelter</li> <li>• Coal gasification and liquefaction</li> <li>• Enhanced oil recovery (EOR)</li> </ul>	<b>5. Secure, Stable and flexible Power Producer</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stable and based load energy production 24 hours in operation.</li> <li>• Output Power scaling from very small to large power capacity</li> <li>• Small power demand and load follower utilization</li> <li>• Multiuse of energy production (electricity and co-generation heat)</li> </ul>	<b>6. Environment, Economy and Sustainability</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Non Green House Gases and other pollutant producer as green energy</li> <li>• Long term operational power producer</li> <li>• Economy competitive</li> <li>• Very less foot print or low land utilization</li> <li>• Very safe energy producer</li> </ul>

Gambar 90 Pemanfaatan PLTN dan Karakteristiknya

#### 4.4.4.1 Energi Nuklir sebagai Energi Beban Dasar (*Based Load Energy*)

Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) dilakukan karena keunggulan yang pertama adalah daya keluaran pembangkit akan senantiasa stabil sepanjang waktu dihasilkan yaitu 24 jam terus menerus sepanjang tahun, karenanya PLTN termasuk sebagai pembangkit energi beban dasar atau *based load*. Karakteristik beban dasar PLTN dapat digunakan sebagai tulang punggung atau *backbone* pasokan listrik kepada konsumen untuk semua level daya keluaran. Karakteristik beban dasar ini karena tingginya faktor kapasitas PLTN yang lebih dari 90% faktor produksi listrik seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 114**. Dalam beberapa kasus, dapat digunakan sebagai energi beban menengah yang dapat dikombinasikan dengan penghasil energi lainnya atau sistem hibrid. Karakteristik energi beban dasar menengah dan penuh tersebut dapat diadopsi untuk kapasitas daya reaktor daya menengah dan besar PLTN. Karakteristik PLTN lainnya dapat diadopsi sebagai energi pengikat beban yang dapat digunakan untuk kebutuhan energi beban fleksibel dengan meningkatkan daya atau menurunkan daya secara fleksibel. Energi pengikat beban ini dapat diadopsi untuk daya reaktor PLTN kecil dan sangat kecil yang relatif cepat mengubah daya karena fleksibilitas permintaan faktor beban.



**Gambar 91** Faktor kapasitas (*Capacity Factor*) berbagai sumber energi (Permana et al., 2022; US EIA, 2015)

#### 4.4.4.2 Energi Nuklir Mengikuti Kebutuhan dan Jaringan

Dalam aspek kebutuhan energi dan konektivitas jaringan, PLTN juga dapat dimanfaatkan berdasarkan kebutuhan energi yang berbeda berdasarkan luas wilayah atau jumlah penduduk untuk tingkat permintaan dan kepadatan penduduk menengah dan tinggi. Daerah dengan kebutuhan sedang dan tinggi atau pada populasi yang sangat padat yang membutuhkan kebutuhan energi yang tinggi ini akan disediakan oleh reaktor PLTN daya sedang dan besar. Untuk konektivitas, dibutuhkan jaringan untuk transmisi dan distribusi. Transmisi jaringan dapat berupa konektivitas jaringan besar lintas pulau atau antar pulau dan dapat *off-grid* untuk digunakan langsung untuk kebutuhan internal atau swasta. PLTN dapat digunakan untuk konektivitas off-grid dan on-grid ini. Untuk daerah atau pulau terpencil serta daerah terpencil dengan infrastruktur energi yang sangat terbatas dan akses terbatas serta tidak ada konektivitas jaringan dari pulau utama ke pulau terpencil atau terpencil, PLTN kecil atau sangat kecil dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan ini. Serupa dengan pulau terpencil, sedikit permintaan karena berkurangnya jumlah penduduk atau berkurangnya beban di daerah tersebut seperti listrik, namun untuk layanan lain seperti resor atau pertambangan di jaringan terisolasi, PLTN untuk reaktor daya sangat kecil dan kecil dapat diadopsi dan dapat digabungkan. dengan penggunaan PLTN kogenerasi lainnya.

#### 4.4.5 Skala Kapasitas Daya Nuklir

PLTN memiliki *output* tingkat daya yang relatif fleksibel sebagai kemampuan Skala Kapasitas Daya. Seperti definisi Badan Energi Atom Internasional (IAEA) mengenai kisaran level reaktor daya, didefinisikan sebagai tiga level keluaran daya. Level daya pertama didefinisikan sebagai reaktor daya besar yang dapat menjadi keluaran daya dari PLTN untuk reaktor daya lebih dari 700 MWe. Output daya tingkat kedua adalah reaktor daya menengah untuk kisaran output 300 MWe hingga 700 MWe. Level ketiga adalah reaktor daya kecil untuk keluaran reaktor kurang dari 300 MWe dan kadang-kadang biasanya kita definisikan sebagai reaktor modular kecil (SMR) karena keluaran dayanya kecil. Namun *output* daya yang kecil ini dibagi menjadi dua tingkat daya *output*, yaitu reaktor daya kecil (SMR) dari 10 MWe sampai kurang dari 300 MWe dan reaktor daya sangat kecil kurang dari 10 MWe atau kadang-kadang dapat disebut sebagai mikroreaktor untuk beberapa MWe atau bahkan daya yang lebih kecil kurang dari 1 MWe (Canadian Nuclear

Safety Commission (CNSC), 2016; IAEA, 2016; IEA, 2022; Kupitz, 2000; Langdon, 2019; Subki, 2018).

#### 4.4.6 Pemanfaatan Multi Guna Energi Nuklir

Pemanfaatan multiguna energi seperti listrik dan produksi kogenerasi energi dapat dilakukan oleh PLTN. Selain produksi listrik, karena kelebihan panas dari reaktor dapat digunakan untuk memanaskan pendingin dan dalam hal ini pendinginnya adalah air, maka produksi panas untuk masyarakat di daerah tersebut dapat disediakan dari kelebihan panas. Produksi kogenerasi lain dari panas berlebih adalah proses desalinasi air serta produksi hidrogen. Listrik dari reaktor dapat digunakan untuk memasok smelter dan juga kombinasi listrik dan panas untuk gasifikasi dan pencairan batubara serta meningkatkan perolehan minyak (EOR). Meskipun beberapa PLTN komersial di seluruh dunia menyediakan energi untuk aplikasi non-listrik, energi nuklir hanya digunakan untuk produksi listrik beban dasar. Misalnya, sekitar 59 unit PLTN di 9 negara yang berbeda (Bulgaria, Republik Ceko, Hongaria, India, Rumania, Rusia, Slovakia, Swiss, Ukraina) telah menggunakan PLTN untuk pemanfaatan khusus untuk pemanasan distrik/panas proses. Selain itu, sekitar 12 unit di beberapa negara (India, Jepang, Pakistan) untuk desalinasi air. Beberapa aplikasi lain untuk kogenerasi PLTN adalah pabrik desalinasi air laut; Pabrik produksi bensin; Fasilitas ekstraksi Pasir Minyak; pabrik produksi Algae e Biofuel; Pemanasan distrik; Produksi bahan bakar seperti diesel dari limbah pirolisis plastik; Pabrik paletisasi kayu limbah; Produksi hidrogen dari pembangkit pemisahan air (IAEA, 2017; Langdon, 2019; Reyes & Hopkins, 2018; Subki, 2018; World Nuclear Association, 2021). Berdasarkan data dari US DOE (2020) pemanfaatan pembangkit listrik tenaga nuklir dari kelas reaktor nuklir 1.000 megawatt dapat menghasilkan lebih dari 150.000 ton hidrogen setiap tahun. Diharapkan dapat menghasilkan hidrogen dalam berbagai metode yang akan sangat mengurangi emisi udara sambil memanfaatkan energi panas konstan dan listrik yang andal disediakannya. pembangkit nuklir dapat menghasilkan uap berkualitas tinggi dengan biaya lebih rendah daripada boiler gas alam dan dapat digunakan dalam banyak proses industri, termasuk *steam-methane reforming*. Namun, kasus nuklir menjadi lebih menarik ketika uap berkualitas tinggi ini dielektrolisis dan dipecah menjadi hidrogen murni dan oksigen. Selain itu, diperkirakan sekitar sepuluh reaktor nuklir dapat menyediakan sekitar 1,5 juta ton per tahun yang

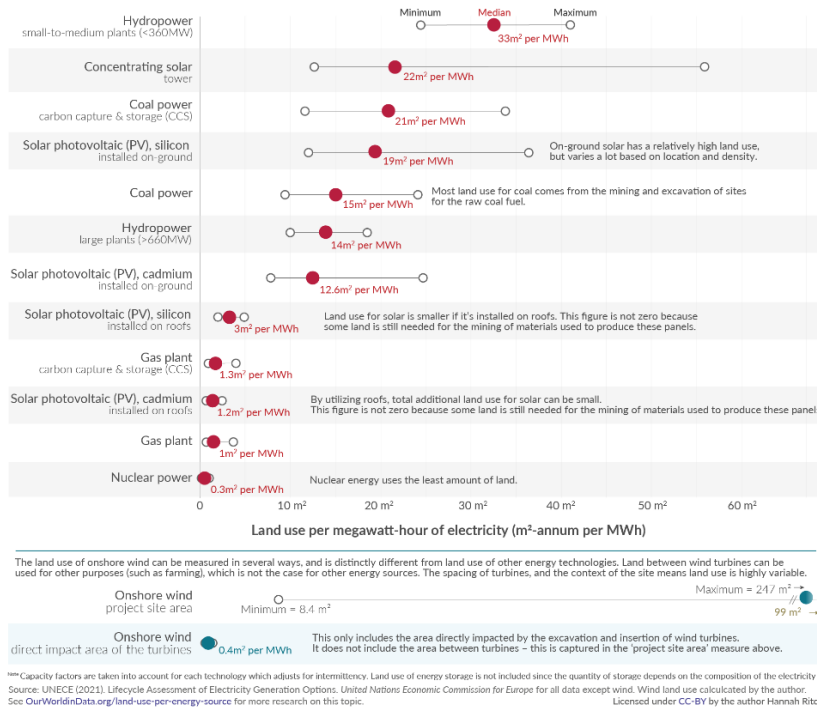
merupakan produksi sekitar 15% dibandingkan dengan pembangkit listrik tenaga air saat ini yang diproduksi di Amerika Serikat (US DOE, 2020a). Sekitar 10 juta metrik ton (MMT) hidrogen saat ini diproduksi di Amerika Serikat setiap tahun, permintaan utamanya adalah untuk penyulingan minyak bumi dan produksi amonia (US DOE, 2022).

#### **4.4.7 Energi Nuklir Penghasil Energi yang Aman, Stabil, dan Fleksibel**

Keuntungan lain mengadopsi PLTN sebagai produksi listrik adalah produksi listrik yang stabil selama 24 jam operasi dan faktor kapasitas dengan lebih dari 90% dapat digunakan sebagai pembangkit listrik berbasis beban. PLTN sebagai pembangkit listrik memberikan jangkauan pemanfaatan daya yang lebih luas dari kapasitas daya yang sangat kecil hingga besar (kurang MWe hingga lebih dari 1000 MWe). Aspek energi beban untuk permintaan daya yang kecil dan pembangkit dengan pengikut beban juga merupakan fitur menarik dari PLTN terutama untuk SMR dan SMR yang sangat kecil. Selain multiguna PLTN, energi yang dihasilkan dari PLTN bersih sehingga PLTN dapat disebut sebagai Non Green House Gases dan penghasil energi pencemar lainnya dan saat ini pemerintah AS dan juga untuk Uni Eropa (UE) telah mengadopsi nuklir dan gas menjadi sumber energi hijau.

# Land use of energy sources per unit of electricity

Land use is based on life-cycle assessment; this means it does not only account for the land of the energy plant itself but also land used for the mining of materials used for its construction, fuel inputs, decommissioning, and the handling of waste.

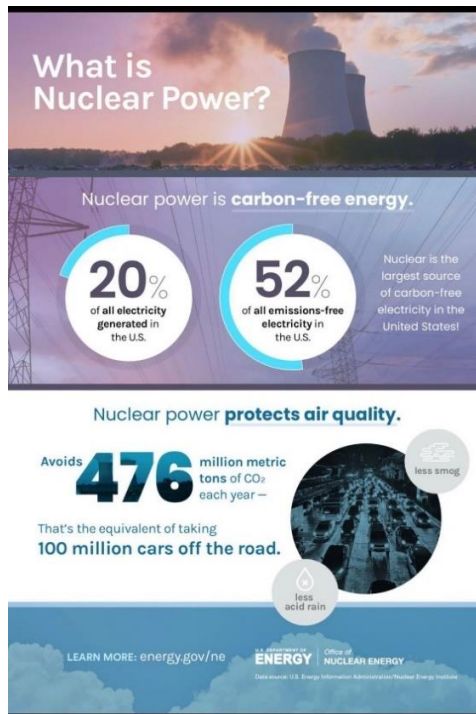


Gambar 115 Penggunaan Lahan Sebagai Sumber Energi per Unit Listrik (Ritchie & Roser, 2022)

## 4.4.8 Energi Nuklir adalah Energi Ramah Lingkungan, Aman, dan Berkelanjutan

PLTN juga memiliki waktu operasi yang unik seperti energi air atau pembangkit listrik tenaga Air (PLTA) di mana operasional dan infrastruktur pembangkit listrik diatur untuk operasional jangka panjang pembangkit listrik yang dapat beroperasi lebih dari 40 tahun, 60 tahun, dan lebih. Oleh karena itu, negara yang mengadopsi program PLTN harus memiliki program pembangkit listrik jangka panjang selain juga mengelola limbah dan bahan bakar nuklir bekas serta proses dekomisioning PLTN. Keunggulan kompetitif lain dari PLTN adalah kompetitif secara ekonomi yang dapat dilihat sebagai biaya LCOE. Ditinjau dari penggunaan lahan atau tapak PLTN sangat rendah karena karakteristik energi densitas yang tinggi seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 115** serta dari segi keamanan, PLTN menunjukkan penghasil energi yang sangat aman. Gambar tersebut menunjukkan bahwa energi nuklir adalah sumber yang paling hemat lahan: per unit listrik. Ini membutuhkan pemanfaatan lahan 50 kali lebih sedikit dibandingkan dengan

pembangkit listrik tenaga batubara serta 18 hingga 27 kali lebih sedikit daripada PV surya di darat (Ritchie & Roser, 2020b). Selain itu, energi nuklir diakui sebagai salah satu sumber energi tanpa emisi yang menghasilkan energi melalui proses fisi nuklir di dalam reaktor nuklir yang tidak menghasilkan produk berbahaya yang dipancarkan oleh bahan bakar fosil seperti emisi CO<sub>2</sub>, partikulat (PM) serta seperti beberapa emisi gas hijau lainnya.



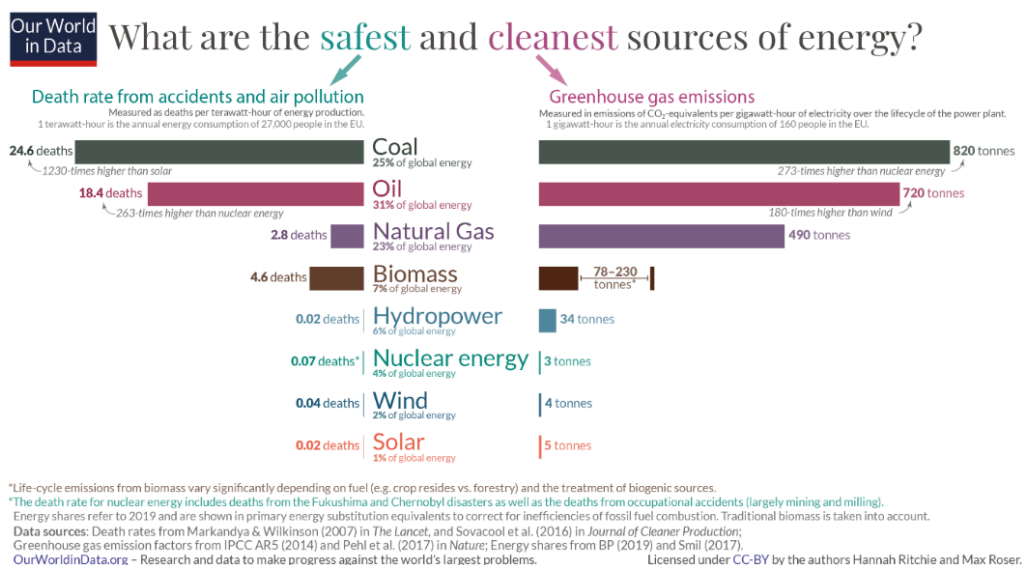
Gambar 92 Nuclear power is carbon-free energy (Markandya & Wilkinson, 2007; US DOE, 2021b)

Institut Energi Nuklir (NEI) mengumumkan bahwa Amerika Serikat telah terhindar dari 476 juta metrik ton pada tahun 2019 yang setara dengan penghapusan 100 juta mobil dari jalan dan lebih dari gabungan semua sumber energi bersih lainnya seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 116** sebagai ilustrasi nuklir adalah energi bebas karbon. Dan pada saat yang sama, energi nuklir juga menjaga kebersihan udara dengan tidak adanya polusi yang keluar dari pembangkit seperti yang dibuat pembangkit fosil di antaranya ribuan ton polutan udara berbahaya setiap tahun yang berkontribusi terhadap hujan asam, kabut asap, kanker paru-paru, dan penyakit kardiovaskular (EnCore Energy Corp, 2022; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015;



Markandya & Wilkinson, 2007; US DOE, 2021a; World Nuclear Association, 2021).

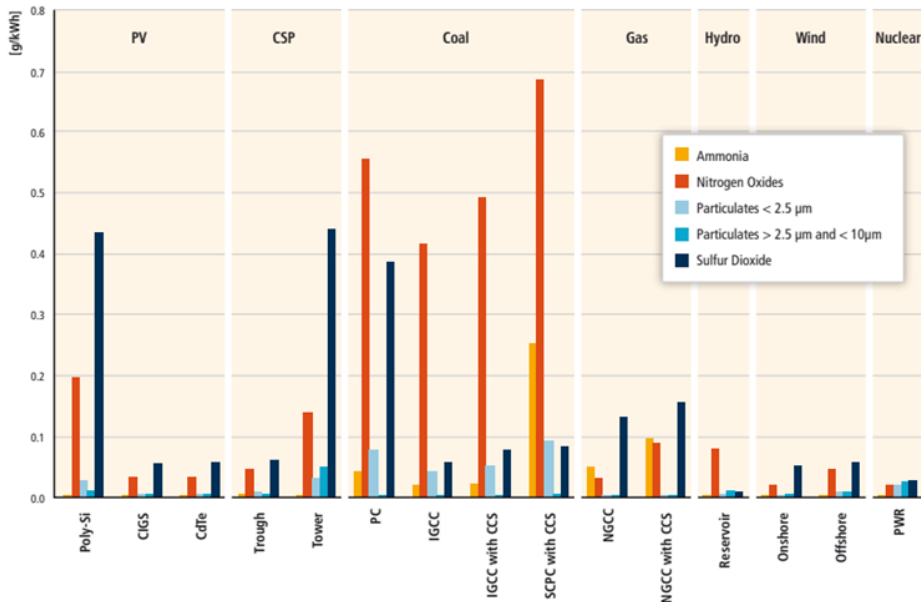
Energi nuklir menghasilkan tenaga listrik melalui reaksi fisi yang diproses oleh atom uranium yang membelah untuk menghasilkan energi. Energi dalam bentuk panas telah dilepaskan oleh reaksi fisi dan memanaskan air sebagai pendingin dan menjadi uap yang dapat digunakan untuk menghasilkan listrik di turbin generator tanpa emisi GRK yang berbahaya. Nuclear Energy Institute (NEI) melaporkan pada tahun 2019 bahwa energi nuklir di AS menghasilkan energi tanpa melepaskan emisi CO<sub>2</sub> ke lingkungan yang setara dengan 476 juta metrik ton emisi CO<sub>2</sub>. Nilai emisi CO<sub>2</sub> tersebut juga setara dengan emisi CO<sub>2</sub> 100 juta mobil (US DOE, 2021a).



**Gambar 93** Comparison of Safest and Cleanest from Various Energy Resources (Ritchie & Roser, 2020b)

Pada saat yang sama, karena emisi GRK yang rendah, diperkirakan dapat menjaga udara dengan polusi yang lebih sedikit atau udara bersih setiap tahun yang berkontribusi terhadap hujan asam, kabut asap, kanker paru-paru, dan penyakit kardiovaskular (Markandya & Wilkinson, 2007). Sebagai perbandingan, energi nuklir juga memiliki emisi (amonia, nitrogen dioksida, dan PM<sub>2.5</sub>) yang sangat rendah yang berasal dari seluruh siklus hidup operasi reaktor air bertekanan (PWR) bukan dari proses pembangkit listrik. Polutan gas dan partikel tersebut dapat menyebabkan dampak kesehatan dari polusi udara. Emisi CO<sub>2</sub> dari pembangkit listrik tenaga nuklir paling rendah dan

sebanding dengan sumber daya rendah emisi CO2 lainnya seperti angin, dan tenaga air. PLTN menghasilkan emisi CO2 270 kali lebih rendah selama operasi siklus hidup (lebih bersih) dan tingkat kematian 350 kali lebih sedikit (lebih aman) dibandingkan dengan tenaga batubara (Ritchie & Roser, 2020b), seperti ditunjukkan pada **Gambar 117**.

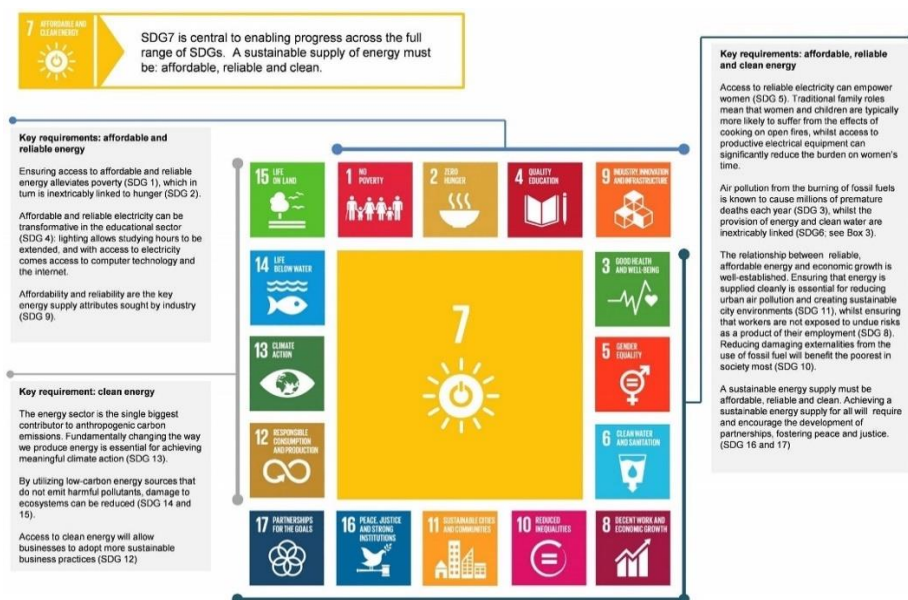


**Catatan :** Hasil inventarisasi siklus hidup dari produksi 1 kWh listrik untuk polutan udara penting yang berkontribusi terhadap paparan partikulat (PM), penyebab utama dampak kesehatan dari polusi udara. Pemodelan teknologi mempertimbangkan peralatan pengendalian polusi yang canggih untuk pembangkit listrik tenaga fosil. Singkatan: PC = batubara bubuk, PV = fotovoltaik, CSP = pemusatan tenaga surya, Poli-Si = silikon polikristalin, CIGS = lapisan tipis tembaga indium gallium selenida, CdTe = lapisan tipis telurida kadmium, IGCC = siklus gabungan gasifikasi terintegrasi, CCS = Penangkapan dan penyimpanan CO2, SCPC = batubara bubuk superkritik, NGCC = siklus gabungan gas alam, PWR = reaktor air bertekanan.

**Gambar 94** Hasil Inventorisasi Siklus Hidup Produksi Listrik 1 KWh Berkontribusi pada Polusi Udara pada Paparan Partikulat (PM) (Bruckner et al., 2014)

Dalam aspek keselamatan, dapat dilihat dari analisis standar keselamatan tertinggi bahwa pembangkit listrik tenaga nuklir memiliki standar keselamatan tertinggi seperti menganalisis perbandingan tingkat kematian dari sumber energi primer (Bruckner et al., 2014; Ritchie & Roser, 2020b). Seperti ditunjukkan pada **Gambar 47**, tingkat kematian akibat produksi energi per terawatt-jam berdasarkan berbagai energi bahan bakar fosil dan energi baru dan terbarukan. Gambar tersebut menunjukkan bahwa energi baru dan terbarukan memiliki tingkat kematian yang sangat rendah (0,02 – 0,07) per *terrawatt-hour* (TWh) dibandingkan dengan bahan bakar fosil (18,43-32,72 TWh) dan energi nuklir adalah salah satu penghasil energi yang paling aman

(0,07 TWh) dari EBT. Angka kematian ini berasal dari kajian potensi kematian akibat kecelakaan serta polusi udara yang termasuk emisi GRK. PLTN memiliki emisi gas rumah kaca paling rendah dibandingkan sumber energi lain dan emisi CO<sub>2</sub> yang rendah di antara sumber EBT. Berdasarkan karakteristik tersebut, energi nuklir telah menunjukkan penghasil energi yang paling aman dan bersih yang mencegah terjadinya fatalitas dalam kegiatan pembangkit listrik serta lebih ramah lingkungan seperti juga ditunjukkan pada **Gambar 118** untuk Polutan Udara Kontribusi Partikulat Matter (PM) Paparan yang menunjukkan NPP (PWR) memiliki kontribusi paparan PM paling rendah (Bruckner et al., 2014).



Gambar 95 SDG 7 – Kunci Untuk Semua SDG (World Nuclear Association, 2022a)

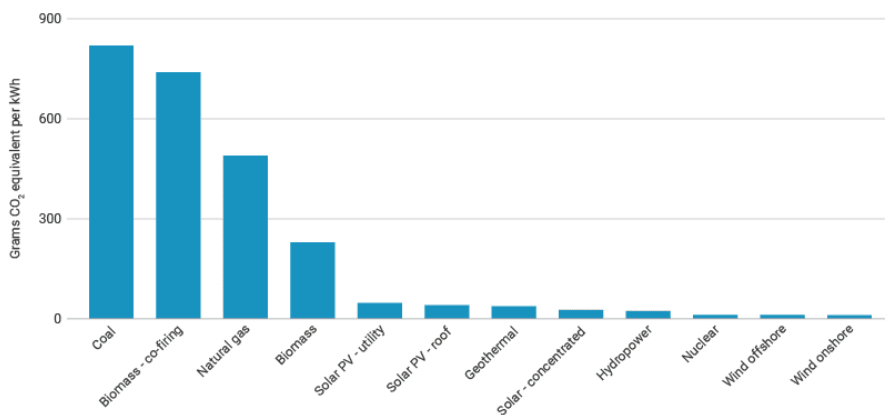
## 4.5 SDG Energi Nuklir, Energi Ramah Lingkungan, dan Berkelanjutan

Konsep keberlanjutan dalam hal ini keberlanjutan energi harus menjadi sangat penting untuk menjadi perhatian ditambahkan juga aspek keamanan pasokan. Sustainability sumber bahan bakar tidak menjamin keamanan pasokan yang secara terus menerus dan berkesinambungan diperlukan dalam aktivitas sehari-hari. Selain aspek kesinambungan suplai energi diperlukan juga sistem yang dibangun agar bisa bersinergi dengan aspek sosial, aspek lingkungan, dan aspek ekonomi. Dengan demikian

keberlanjutan harus juga mengedepankan sinergitas dengan sosial, ekonomi, dan lingkungan. Keseimbangan antara faktor tersebut menjadi tantangan tersendiri dan tidak mudah. Oleh karena itu untuk mencakup konsep keberlanjutan, energi menjadi salah satu aspek penting bagi aktivitas masyarakat saat ini di mana SDG 7 tersebut dapat dihubungkan dan didukung oleh semua SDG lainnya yang telah disebutkan dalam **Gambar 119**, bahwa pasokan energi yang berkelanjutan harus terjangkau, dapat diandalkan dan bersih.

### 4.5.1 Pilar Lingkungan Hidup

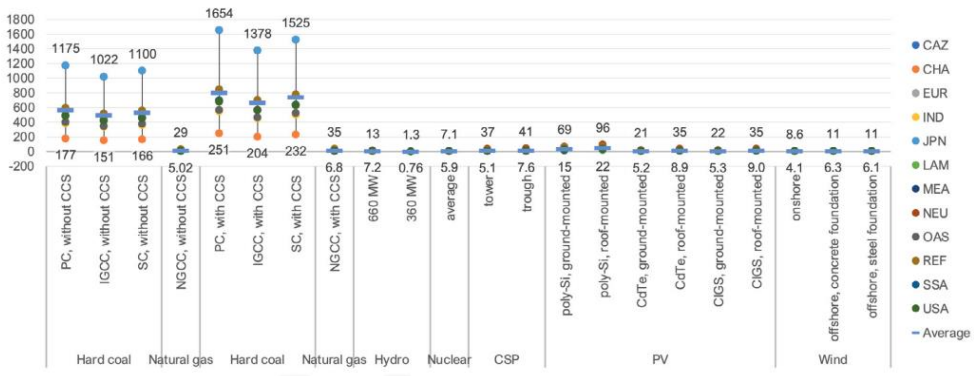
Perserikatan Bangsa-Bangsa mengakui perubahan iklim sebagai "ancaman paling sistemik bagi umat manusia". Dengan demikian, menanganinya umumnya dianggap sebagai tantangan keberlanjutan yang paling signifikan dan mendesak. Perubahan iklim diakibatkan oleh meningkatnya konsentrasi CO<sub>2</sub> di atmosfer bumi. Mengingat bahwa tiga perempat dari emisi CO<sub>2</sub> antropogenik dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil untuk energi, fokus utama harus pada penerapan teknologi energi yang hanya memancarkan sejumlah kecil CO<sub>2</sub> per unit energi yang ditunjukkan pada **Gambar 120**. Pada kehidupan -dasar siklus, tenaga nuklir memancarkan hanya beberapa gram setara CO<sub>2</sub> per kWh listrik yang dihasilkan. Nilai rata-rata setara 12g CO<sub>2</sub>/kWh telah diperkirakan untuk nuklir- serupa dengan angin, dan lebih rendah dari semua jenis surya (World Nuclear Association, 2022a).



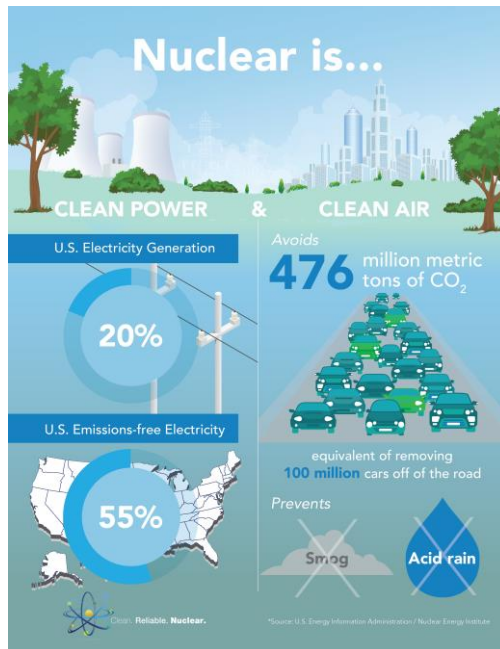
**Gambar 96** Emisi setara rata-rata siklus hidup CO<sub>2</sub> (sumber: IPCC) (World Nuclear Association, 2022a).

### 5.5.1.1 Perlindungan Ekosistem

Dampak utama produksi listrik pada ekosistem adalah eutrofikasi (yaitu peningkatan konsentrasi nutrisi kimia, terutama nitrogen dan fosfor, yang merusak kualitas air dengan menyebabkan penipisan oksigen) dan pengasaman (yaitu peningkatan konsentrasi bahan kimia asam – yang disebabkan oleh penyerapan CO<sub>2</sub> di atmosfer – yang merusak kualitas air, merusak kerang dan karang, dan menyebabkan pertumbuhan alga yang berlebihan). Di antara teknologi penghasil tenaga, bahan bakar fosil sejauh ini memiliki potensi terbesar untuk menyebabkan pengasaman dan eutrofikasi. CO<sub>2</sub> yang dilepaskan ke atmosfer selama pembakaran bahan bakar fosil larut ke lautan, meningkatkan keasamannya; dan penambangan, ekstraksi, pengangkutan, pengolahan limbah, dan emisi yang terkait dengan penggunaan bahan bakar fosil berkontribusi terhadap potensi eutrofikasinya yang tinggi seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 121**. Sebaliknya, potensi pengasaman dan eutrofikasi tenaga nuklir diperkirakan termasuk yang terendah dari semuanya teknologi generasi yang tersedia (World Nuclear Association, 2022b).

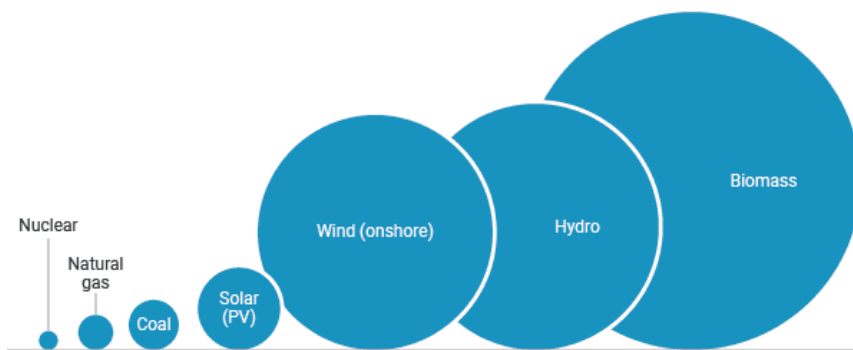


**Gambar 97** Emisi eutrofikasi siklus hidup pada 2020, dalam unit gram setara Fosfor per MWh (Economic Commission for Europe, 2022)



**Gambar 98** Kontribusi Energi Nuklir di Amerika Serikat (US DOE, 2020b)

Menurut Institut Energi Nuklir (NEI), Amerika Serikat menghasilkan listrik dari energi nuklir sekitar 20% dari total energi nasionalnya tanpa menghasilkan 471 juta metrik ton emisi karbon dioksida pada tahun 2020. Emisi karbon tersebut setara dengan menghilangkan 100 juta mobil dari jalan dan lebih dari gabungan semua sumber energi bersih lainnya seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 122**. Juga menjaga kebersihan udara dengan membuang ribuan ton polutan udara berbahaya setiap tahun yang berkontribusi terhadap hujan asam, kabut asap, kanker paru-paru, dan penyakit kardiovaskular (US DOE, 2021a). Pemenuhan kebutuhan energi listrik sesuai dengan target nasional dan saat bersamaan dapat mengurangi emisi CO<sub>2</sub> dan polusi udara lainnya merupakan konsep ideal dari target SDG 7, yaitu energi terjangkau dan bersih, sehingga SDG yang lain bisa dibantu dengan adanya SDG7 ini.

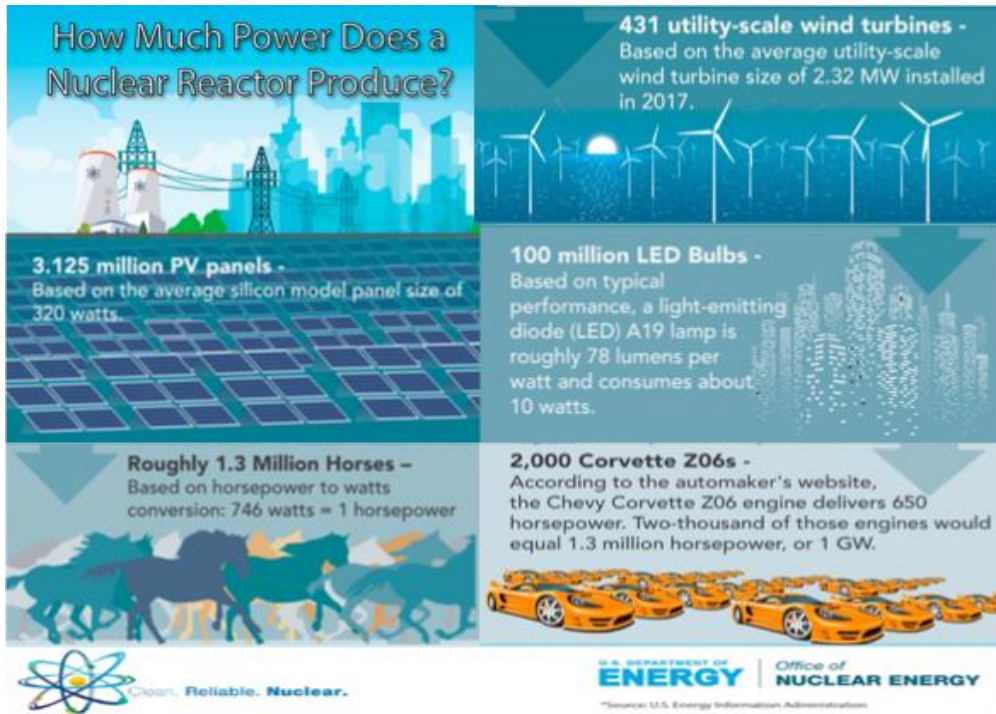


**Gambar 99** Penggunaan tanah relatif (Tambang Bahan Bakar dan Pembangkit) Opsi Pembangkit Listrik Per Unit Listrik (Brook & Bradshaw, 2015; World Nuclear Association, 2022a).

### 5.5.1.2 Penggunaan Tanah dan Air

Penggunaan tanah dan air adalah kriteria utama untuk menilai keberlanjutan berbagai teknologi produksi listrik seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 123** untuk penggunaan lahan relatif dari pembangkitan listrik. Sektor listrik bersaing untuk mendapatkan sumber daya yang terbatas dengan sektor penting lainnya seperti pertanian, industri dan perumahan, dan munculnya konsep baru yang dikenal sebagai perhubungan air-makanan-energi mencerminkan apresiasi yang tumbuh dari keterkaitan keputusan kebijakan di ketiga bidang ini (World Nuclear Association, 2022a). Pembangkit listrik tenaga nuklir menghasilkan tenaga rendah karbon dalam jumlah besar dan membutuhkan lebih sedikit lahan untuk melakukannya daripada sumber energi lainnya. PBB memperkirakan dua pertiga orang akan tinggal di daerah perkotaan pada tahun 2050 – tambahan 2,5 miliar orang – di mana lahan merupakan harga premium. Ditambah dengan kebutuhan untuk melestarikan lahan untuk mencegah hilangnya keanekaragaman hayati, keuntungan penggunaan lahan yang unik dari energi nuklir akan terbukti semakin menentukan di masa depan (World Nuclear Association, 2022a). Sebagai ilustrasi, pembangkit listrik tenaga nuklir dua unit yang besar diperkirakan dapat menyediakan pasokan listrik untuk sekitar 4-5 juta orang dan membutuhkan tapak 2 kilometer persegi untuk pembangkit listrik. Namun, penggunaan lahan dari semua teknologi penghasil energi melampaui jejak produksinya, dan mencakup penambangan bahan baku yang diperlukan dan, untuk sumber tenaga konvensional, siklus bahan bakarnya. Mempertimbangkan hal ini, penggunaan lahan untuk pembangkit listrik tenaga biomassa, air, angin, dan matahari membutuhkan lahan yang cukup

besar dibandingkan nuklir dan energi fosil. Hal ini menjadi perhatian khusus untuk pemanfaatan yang optimal lahan agar tidak terjadi perubahan fungsi lahan produktif menjadi pembangkit. Di sisi lain efek dari penyediaan lahan menjadi problem ekonomi tersendiri dan problem sosial yang tentunya memerlukan penanganan secara khusus dan berkesinambungan. (World Nuclear Association, 2022b).

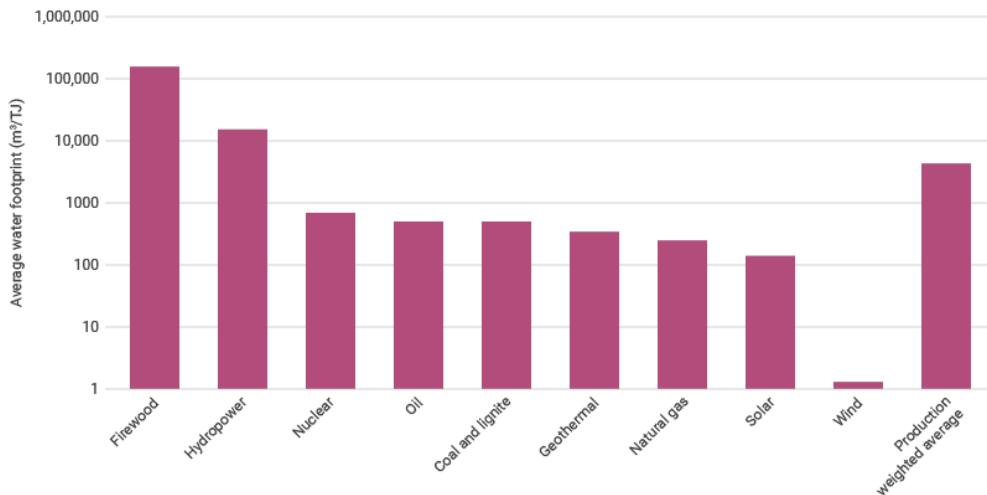


**Gambar 100** Fasilitas Nuklir Berkapasitas 1000 MWe Setara Energi Lain di Amerika Serikat (US DOE, 2021b)

Fasilitas nuklir khas 1.000 megawatt di Amerika Serikat membutuhkan lebih dari 1 mil persegi untuk beroperasi. NEI mengatakan ladang angin membutuhkan 360 kali lebih luas lahan untuk menghasilkan jumlah listrik yang sama dan pembangkit fotovoltaik surya membutuhkan ruang 75 kali lebih banyak. Sebagai gambaran, Anda memerlukan lebih dari 3 juta panel surya untuk menghasilkan jumlah daya yang sama dengan reaktor komersial pada umumnya atau lebih dari 430 turbin angin (tidak termasuk faktor kapasitas) seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 124** (US DOE, 2021b). Pada beberapa tahap selama pasokan, konstruksi atau operasi, semua opsi pembangkit listrik mengkonsumsi air seperti yang ditunjukkan pada **Gambar**



**125** untuk konsumsi air per unit listrik dan panas 2008-2012. Energi angin dan matahari memiliki 'jejak' air terkecil, sedangkan biomassa dan tenaga air memiliki yang terbesar. Bahan bakar fosil dan nuklir mengkonsumsi air dalam jumlah yang signifikan dalam fase operasional untuk pendinginan. Air tawar adalah sumber daya yang berharga di sebagian besar dunia. Selain kedekatan dengan pusat beban utama, tidak ada alasan untuk menempatkan pembangkit listrik tenaga nuklir jauh dari pantai, di mana mereka dapat menggunakan pendinginan air laut sekali pakai.



**Gambar 101** Konsumsi Air Per Unit Listrik dan Panas Diproduksi tahun 2008-2012 (Mekonnen et al., 2015; World Nuclear Association, 2022a)

Densitas energi uranium yang tinggi menggambarkan persyaratan logistik untuk bahan bakar lebih sederhana yaitu sekitar 100-200 ton untuk reaktor besar sekitar 1000 Mwe pada setiap awal tahun pertama reaktor beroperasi dan setiap 1-2 tahun memerlukan 30 ton untuk suplai bahan bakar baru dan dibandingkan dengan keperluan lebih dari 3.000.000 ton untuk pembangkit listrik tenaga batubara yang setara) yang memungkinkan penempatan pembangkit listrik tenaga nuklir yang fleksibel. Jika air sangat terbatas sehingga tidak dapat digunakan untuk pendinginan, dan lokasi pesisir tidak tersedia, pembangkit listrik dapat ditempatkan jauh dari kebutuhan beban, tetapi hal ini akan menimbulkan biaya transmisi tambahan. Sementara pembangkit listrik tenaga nuklir membutuhkan air dalam jumlah yang signifikan untuk pendinginan, kemampuan mereka untuk menyediakan daya dalam jumlah besar semakin banyak digunakan untuk mengamankan pasokan air di daerah yang kekurangan air. Jika air minum tidak dapat

diperoleh dari sungai dan akuifer, diperlukan desalinasi air laut, air tanah mineral, atau air limbah perkotaan. Sebagian besar desalinasi saat ini ditenagai oleh bahan bakar fosil, tetapi desalinasi nuklir telah digunakan selama bertahun-tahun di negara-negara seperti Jepang, India, dan Kazakhstan (World Nuclear Association, 2022b).

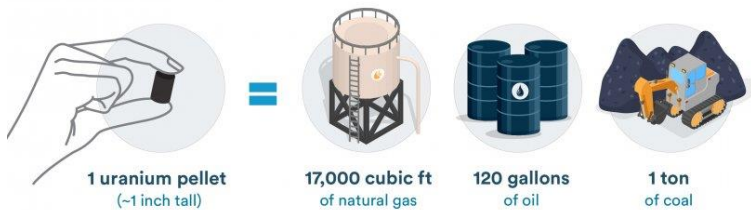
### **5.5.1.3 Sampah Bahan Bakar Bekas**

Pengelolaan limbah bahan bakar bekas secara hati-hati dilakukan merupakan pertimbangan keberlanjutan utama untuk mencegah kerugian jangka pendek atau jangka panjang bagi manusia dan lingkungan. Semua teknologi penghasil energi menghasilkan limbah, tetapi jumlah yang dihasilkan, risiko yang ditimbulkannya, dan cara pengelolaannya sangat bervariasi. Kepadatan energi bahan bakar yang digunakan untuk pembangkit listrik merupakan salah satu penentu utama besarnya dan pengelolaan limbah. Kepadatan energi uranium yang sangat tinggi berarti jumlah bahan bakar yang relatif kecil diperlukan per unit energi yang dihasilkan. Menggunakan lebih sedikit bahan bakar mengurangi skala kegiatan ekstraksi bahan bakar dan persyaratan pengangkutan yang pada gilirannya mengurangi kemungkinan pelepasan lingkungan yang tidak diinginkan dan menghasilkan lebih sedikit limbah. Berlawanan dengan kepercayaan populer, oleh karena itu, salah satu manfaat menghasilkan listrik dari energi nuklir adalah aliran limbahnya kecil, dan oleh karena itu dapat dikelola secara alami. Karena alasan inilah energi nuklir adalah satu-satunya bentuk pembangkit listrik yang sepenuhnya mengandung emisi, limbah, dan limbahnya (World Nuclear Association, 2022b). Tidak seperti energi nuklir, beberapa sumber energi membuang limbah ke lingkungan, atau memiliki dampak kesehatan yang tidak diperhitungkan dalam produk. Subsidi implisit ini, atau biaya eksternal sebagaimana umumnya disebut, bagaimanapun juga terjadi dan biasanya dapat diukur, dan ditanggung oleh masyarakat luas. Kuantifikasi mereka diperlukan untuk memungkinkan pilihan rasional antara sumber energi. Energi nuklir menyediakan biaya pengelolaan limbah, pembuangan dan dekomisioning dalam biaya aktual listrik (yaitu telah menginternalisasinya), sehingga biaya eksternal diminimalkan (World Nuclear Association, 2022b).

## Fast Facts on

## NUCLEAR ENERGY

Nuclear fuel is **extremely energy dense**.



U.S. DEPARTMENT OF  
**ENERGY**

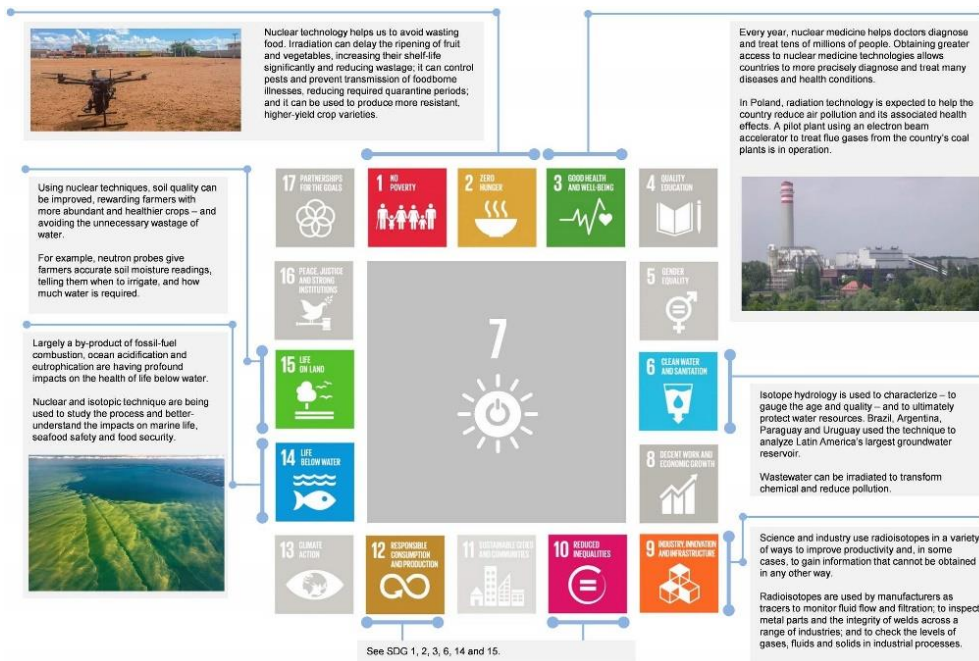
Office of  
**NUCLEAR ENERGY**

**LEARN MORE** [energy.gov/ne](https://energy.gov/ne)

Data source: U.S. Energy Information Administration

**Gambar 102** Konsumsi Bahan Bakar Nuklir dan Bahan Energi lainnya (US DOE , 2021).

Secara umum sebagai bahan bakar, bahan bakar nuklir sangat padat digunakan untuk menghasilkan panas dan diubah menjadi listrik. Perbandingannya seperti juga disebutkan pada **Gambar 126** bahwa bahan bakar nuklir menghasilkan energi sebesar 1 juta kali lebih besar dari sumber energi tradisional lainnya. Kepadatan bahan bakar yang tinggi ini akan membuat jumlah bahan bakar nuklir yang digunakan sangat sedikit. Dapat diperkirakan akumulasi bahan bakar nuklir bekas yang diproduksi oleh industri energi nuklir AS selama 60 tahun terakhir akan sama dengan lapangan sepak bola pada kedalaman kurang dari 10 yard (sekitar 9 m). Karena limbah tersebut menghasilkan beberapa nuklida berat termasuk Uranium dan Plutonium yang dapat digunakan untuk pengolahan di masa mendatang, bahan bakar nuklir bekas tersebut juga dapat diolah kembali dan didaur ulang untuk pemanfaatan selanjutnya terutama untuk beberapa desain reaktor canggih yang dikembangkan dapat beroperasi dengan bahan bakar bekas (US DOE , 2021).



**Gambar 103** Kontribusi Energi Nuklir Untuk Mengamankan Pasokan Air Bersih, Sanitasi dan Makanan yang dapat di andalkan. (World Nuclear Association, 2022b)

## 4.5.2 Aspek Sosial Energi Nuklir

### 4.5.2.1 Kesehatan Manusia Dari Polusi Udara

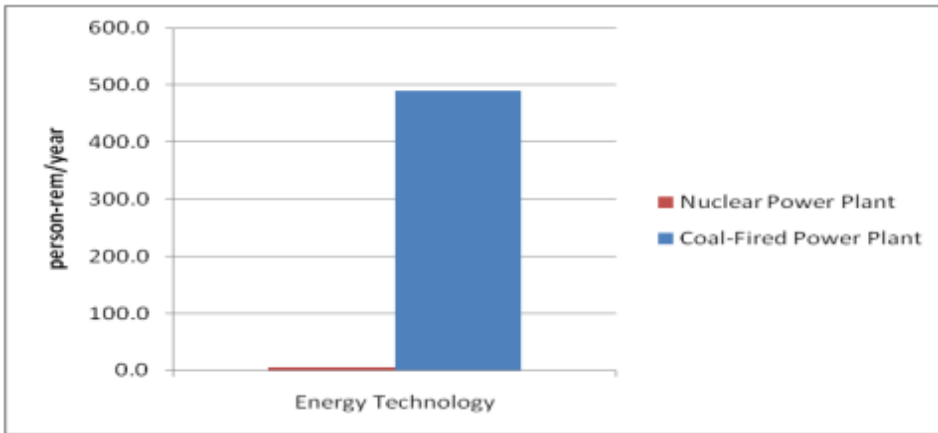
Polusi udara yang timbul dari penggunaan bahan bakar berbasis karbon untuk energi merupakan salah satu ancaman terbesar bagi kesejahteraan manusia. Organisasi Kesehatan Dunia memperkirakan bahwa sekitar 7 juta orang meninggal sebelum waktunya setiap tahun akibat paparan polusi udara. Pembangkit listrik tenaga nuklir hampir tidak mengeluarkan polutan udara selama beroperasi, dan karena dapat diandalkan dan dapat digunakan dalam skala besar, mereka dapat langsung menggantikan pembangkit berbahan bakar fosil. Institut Goddard NASA untuk Studi Luar Angkasa dan Institut Bumi Universitas Columbia memperkirakan bahwa penggunaan tenaga nuklir mencegah lebih dari 1,8 juta kematian terkait polusi udara antara tahun 1971 dan 2009. Ada banyak penggunaan teknologi nuklir non-tenaga yang berkontribusi pada pemenuhan kebutuhan manusia. Misalnya: penyelenggaraan kedokteran nuklir; membantu mengendalikan penyebaran penyakit menular; dan mengamankan pasokan air bersih, sanitasi, dan

makanan yang dapat diandalkan seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 127** yang terkait dengan Target SDG 7 (World Nuclear Association, 2022b).

### **5.5.2.2 Kesehatan Manusia dari Radiasi Nuklir**

Radiasi dalam hal ini spesifik pada radiasi nuklir dapat dipahami dengan baik baik proses maupun level dosisnya baik radiasi alamiah maupun buatan manusia. Radiasi dengan sumber alami berkontribusi sebagian besar radiasi yang diterima manusia setiap tahun. Dosis radiasi nuklir yang diterima rata-rata 2,4 mSv/tahun, akan tetapi nilai dosis ini sangat bervariasi bergantung pada lokasi, kemudian faktor-faktor lainnya seperti geologi dan ketinggian yang mendasarinya. Tingkat radiasi latar tertinggi yang diketahui mempengaruhi populasi besar adalah di negara bagian Kerala dan Madras di India di mana sekitar 140.000 orang menerima dosis yang rata-rata lebih dari 15 mSv/tahun dari radiasi gamma, selain dosis serupa dari radon. Tingkat yang sebanding terjadi di Brazil dan Sudan, dengan paparan rata-rata hingga sekitar 40 mSv/tahun ke banyak orang. Dosis seumur hidup dari kisaran radiasi alami hingga beberapa ribu millisieverts. Namun, tidak ada bukti peningkatan kanker atau masalah kesehatan lain yang timbul dari tingkat alami yang tinggi ini.

Sekitar 20 mSv/tahun adalah batas rata-rata yang diizinkan saat ini untuk karyawan industri nuklir dan penambang uranium selama operasi normal. Jutaan pekerja nuklir yang telah dipantau secara ketat selama 50 tahun tidak memiliki angka kematian akibat kanker yang lebih tinggi daripada populasi umum tetapi memiliki dosis rata-rata hingga sepuluh kali lipat. Teknologi nuklir adalah satu-satunya teknologi yang secara sistematis mengukur dan memperhitungkan emisi radioaktif. Namun, paparan radiasi di atas level radiasi latar belakang alami tidak hanya khusus untuk aktivitas terkait pembangkit listrik nuklir atau fasilitas nuklir lainnya. UNSCEAR memperkirakan bahwa paparan pekerjaan dan publik dari pembangkit listrik lebih tinggi bagi pekerja di industri batubara (World Nuclear Association 2022b).



**Gambar 104** Paparan Radiasi Terhadap Publik dari PLTN 1000 MWe (Oludare, 2018)

Hal yang dipermasalahkan adalah kandungan uranium dan thorium, keduanya unsur radioaktif. Mereka terjadi dalam jumlah sangat kecil di alam, atau batubara "utuh", sehingga tidak menjadi masalah. Tetapi ketika batu bara dibakar menjadi abu terbang, uranium dan torium terkonsentrasi hingga 10 kali lipat dari kadar aslinya. Dalam sebuah makalah tahun 1978 untuk Science, J. P. McBride di Oak Ridge National Laboratory (ORNL) dan rekan-rekannya mengamati kandungan uranium dan thorium dari abu layang dari pembangkit listrik tenaga batu bara di Tennessee dan Alabama. Untuk menjawab pertanyaan betapa berbahayanya pencucian, para ilmuwan memperkirakan paparan radiasi di sekitar pembangkit listrik tenaga batubara dan membandingkannya dengan tingkat paparan di sekitar reaktor air mendidih dan pembangkit listrik tenaga nuklir air bertekanan. Total pelepasan radioaktivitas yang diharapkan dari pembakaran batubara dari tahun 1937 hingga 2040 diproyeksikan menjadi 477.027.320 milicuri. Ditemukan bahwa pembangkit listrik tenaga batu bara 1000 MWe memaparkan populasi hingga 490 orang-rem/tahun, dan pembangkit listrik tenaga nuklir 1000 MWe memaparkan populasi hingga 4,8 orang-rem/tahun seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 128** (Hvistendahl, 2007; Oludare, 2018).

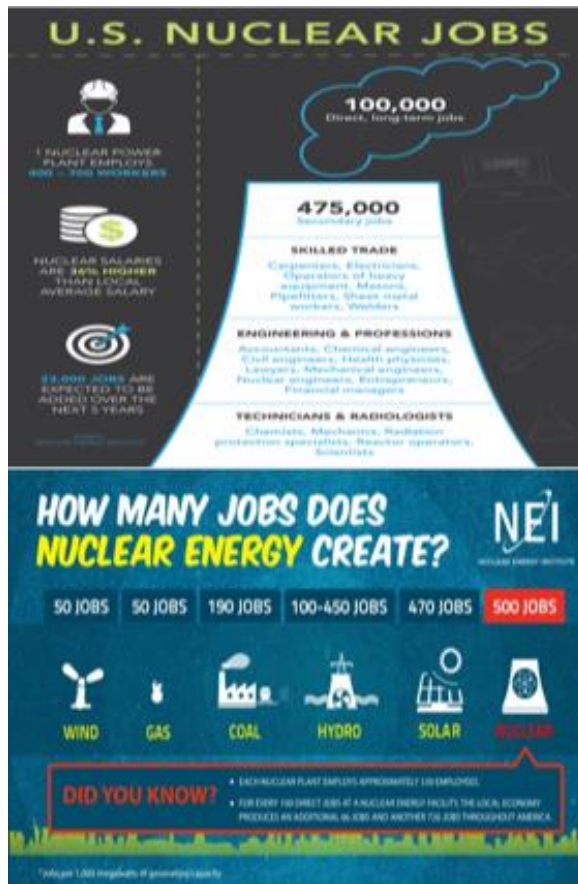


**Gambar 105** Selama proses konstruksi pada Reaktor Besar dan Modern, ribuan Perkan dibutuhkan. Pada PLTN Hinkley Point C, di butuhkan 8000 Pekerja on-site selama puncak pembangunan (World Nuclear Association, 2022b)

### 5.5.2.3 Membuka Lapangan Pekerjaan di Fasilitas Nuklir

Pembangkit listrik tenaga nuklir dapat beroperasi selama lebih dari 60 tahun, menciptakan pekerjaan jangka panjang dengan gaji tinggi bagi orang-orang dari berbagai bidang dan latar belakang pendidikan. Oleh karena itu, menjalankan program energi nuklir merupakan investasi jangka panjang dalam sumber daya manusia. Investasi pada proyek padat modal cenderung menyebar ke industri dan sektor ekonomi lain. Pembangkit listrik tenaga nuklir skala gigawatt modern mempekerjakan 500-1000 pekerja secara langsung. Namun selama konstruksi dan operasinya, ia membutuhkan rantai pasokan pendukung yang kompleks (misalnya konstruksi, manufaktur, dan layanan konsultasi), menciptakan peluang kerja tidak langsung dan terinduksi yang menarik seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 129** selama masa konstruksi membutuhkan banyak pekerja. Sebuah studi tentang industri nuklir Eropa oleh Deloitte menyatakan bahwa nuklir menyediakan lebih banyak pekerjaan per TWh listrik yang dihasilkan daripada sumber energi bersih lainnya. Menurut laporan tersebut, industri nuklir menopang lebih dari 1,1 juta pekerjaan di Uni Eropa. Selain itu, setiap gigawatt kapasitas nuklir terpasang menghasilkan €9,3 miliar dalam investasi tahunan di bidang nuklir dan sektor ekonomi terkait, dan menyediakan lapangan kerja permanen dan lokal bagi hampir 10.000 orang. Untuk setiap €1 yang diinvestasikan, industri nuklir menghasilkan kontribusi tidak langsung

sebesar €4 dalam PDB, dan setiap pekerjaan langsung menciptakan 3,2 pekerjaan di UE secara keseluruhan (World Nuclear Association, 2022b).



**Gambar 106** Industri Energi Nuklir Berkontribusi Dalam Menciptakan Lapangan Kerja (NEI, 2022).

Industri energi nuklir adalah mesin yang kuat untuk penciptaan lapangan kerja. Sektor energi nuklir Amerika Serikat (AS) secara langsung mempekerjakan hampir 100.000 orang dalam pekerjaan jangka panjang berkualitas tinggi. Angka ini naik menjadi 475.000 jika Anda memasukkan pekerjaan sampingan seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 130**. Berdasarkan data dari Fakta Singkat tentang Pekerjaan Industri Nuklir di AS yang menyimpulkan bahwa (NEI, 2022):

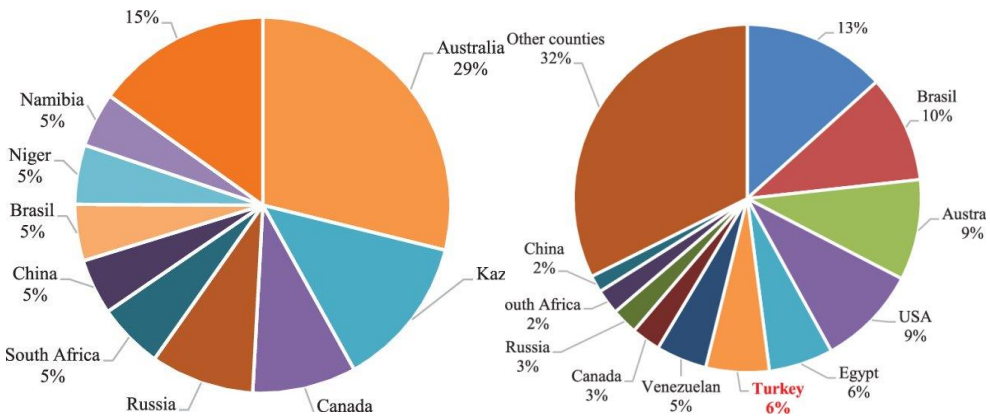
1. Setiap PLTN mempekerjakan 500 sampai 800 pekerja.
2. Pembangkit listrik tenaga nuklir dapat beroperasi hingga 80 tahun atau lebih, sehingga pembangkit listrik tenaga nuklir dapat menyediakan lapangan kerja bagi banyak generasi pekerja.



3. Membangun reaktor tenaga nuklir mempekerjakan hingga 7.000 pekerja pada konstruksi puncak.
4. Gaji pekerja nuklir rata-rata 50 persen lebih tinggi daripada sumber pembangkit listrik lainnya.
5. Industri nuklir AS menghabiskan sekitar \$11 miliar per tahun untuk tenaga kerja, yaitu sekitar \$100 juta per reaktor per tahun.
6. Untuk setiap 100 pekerjaan pembangkit listrik tenaga nuklir, 66 pekerjaan lagi tercipta di masyarakat setempat.
7. Hampir satu dari empat pekerja nuklir adalah veteran.

### 5.5.3 Aspek Ekonomi Sumber Energi Nuklir

Bahan bakar uranium digunakan secara terbatas dengan fokus pada produksi energi nuklir baik untuk produksi listrik maupun non-listrik. Memproduksi listrik dengan uranium memperluas basis sumber daya keseluruhan yang tersedia untuk digunakan manusia, memberikan keragaman pilihan yang lebih besar dan memungkinkan penggunaan sumber daya lainnya terutama bahan bakar fosil, seperti hidrokarbon, digunakan secara lebih optimum dan efektif, misalkan pada alat-alat transportasi atau fasilitas kegiatan petrokimia.

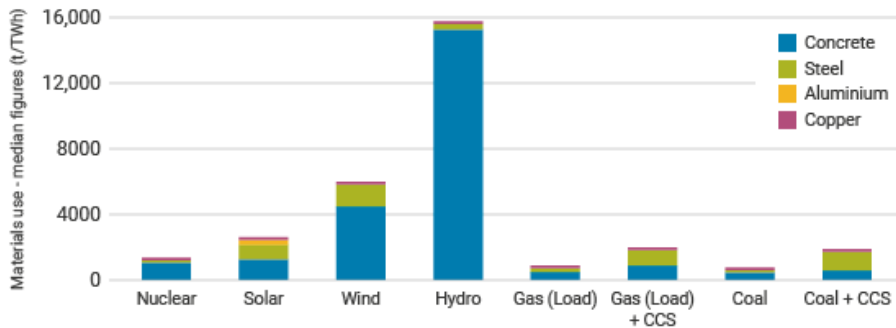


Gambar 107 Cadangan Uranium dan Thorium Dunia (Ağbulut, 2019).

#### 5.5.3.1 Kecukupan Sumber Daya, Pelestarian, dan Biaya Peluang

Sumber daya uranium yang berlimpah dan menyebar di berbagai negara dan benua dengan keadaan geopolitik dan struktur ekonomi yang beragam. Dengan sebaran distribusi uranium yang bervariasi di beberapa wilayah dapat

mengurangi risiko kekhawatiran gangguan pasar yang dialami selama sejarah krisis minyak dan gas seperti monopoli bahan bakar dan distribusinya (World Nuclear Association, 2022b). Saat ini, dengan cadangan yang diketahui, jumlah uranium di dunia adalah sekitar 5.698.400 ton. Australia, Kazakhstan, Kanada, dan Rusia memiliki 60% dari total cadangan uranium di dunia dan bagian mereka masing-masing adalah 29%, 13%, 9% dan 9% seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 131** dan jumlah thorium di dunia adalah sekitar 6.355.000 ton (Ağbulut, 2019).



**Gambar 108** Penggunaan Material Untuk Berbagai Sumber Energi (World Nuclear Association, 2022b)

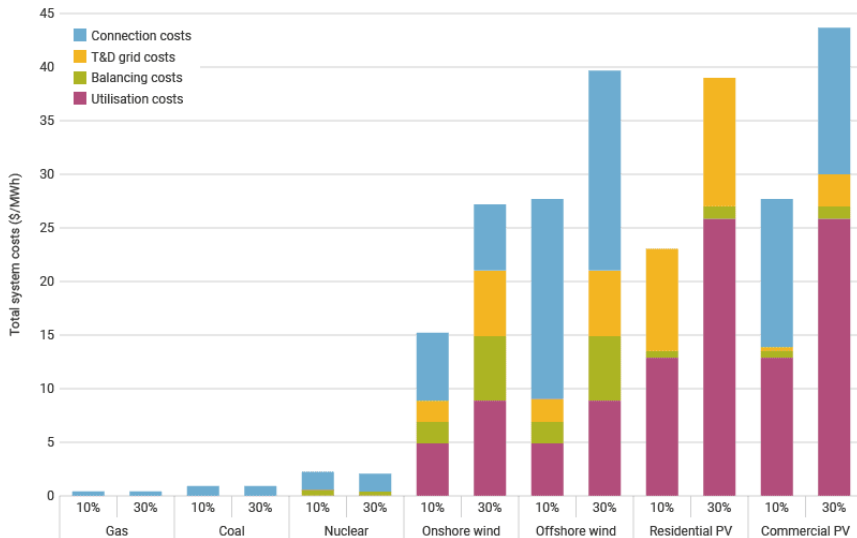
### 5.5.3.2 Efisiensi Sumber Daya dan Keluaran Material (*Material Throughput*)

Fokus pada sumber energi yang didefinisikan sebagai 'terbarukan' selama beberapa dekade terakhir mencerminkan pentingnya pelestarian sumber daya yang terbatas. Sumber energi terbarukan adalah yang dihasilkan dari proses alami yang terus menerus diisi ulang atau senantiasa tersedia. Oleh karena itu, teknologi terbarukan didefinisikan sebagai teknologi yang tidak digerakkan oleh sumber daya yang terbatas. Keseimbangan antargenerasi adalah prinsip utama pembangunan berkelanjutan, sehingga keuntungan yang diklaim sebagai pilihan energi terbarukan yaitu bahwa mereka tidak mengurangi sumber daya bahan bakar yang terbatas untuk generasi mendatang merupakan konsep yang sangat penting. Namun, pasokan bahan bakar hanyalah salah satu aspek dari kebutuhan material untuk pembangkit listrik. Semua cara untuk menghasilkan listrik membutuhkan infrastruktur yang menghabiskan sumber daya yang terbatas, dengan input material utama berdasarkan volume di luar suplai bahan bakar biasanya beton dan logam (misalnya aluminium, tembaga, baja). Perkiraan penggunaan bahan curah (bulk) utama dan tembaga per TWh untuk teknologi yang berbeda telah

dihasilkan oleh organisasi lingkungan *Bright New World*, berdasarkan tinjauan literatur studi sebagaimana disebutkan juga dalam **Gambar 132**. Tujuan pengurangan input material adalah konsep sentral pembangunan berkelanjutan. Menggunakan material dalam produksi, transportasi, dan penerapan teknologi penghasil tenaga akan menghabiskan energi dalam bentuk bahan bakar fosil, dan dengan demikian metrik *through put material* menjadi penting dengan mempertimbangkan efisiensi energi serta emisi karbon daur hidup. Konsumsi bahan-bahan primer diperkirakan meningkat lebih dari dua kali lipat pada tahun 2050. Menggunakan energi nuklir untuk menghasilkan listrik adalah salah satu cara untuk mengurangi permintaan sumber daya energi ke tingkat yang lebih berkelanjutan (World Nuclear Association, 2022b).

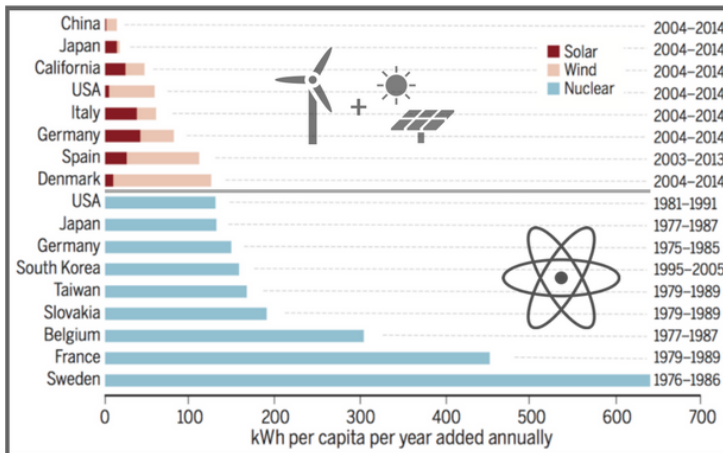
### **5.5.3.3 Keterjangkauan Ekonomi**

Keterjangkauan ekonomi merupakan komponen kunci untuk SDG 7. Keterbukaan dan manfaat pada akses energi modern yang dikelola sangat besar dan terbuka, akan tetapi keinginan akan akses yang terbuka dan setara dapat dipastikan jika semuanya hanya dapat diwujudkan jika aspek ekonomi terjangkau. Keterjangkauan relatif dapat dilihat dari pilihan pasokan listrik yang merupakan fungsi dari biaya pembangkitan serta biaya yang dikenakan pada sistem. Biaya pembangkitan biasanya menggunakan metrik biaya pembangkitan listrik (LCOE), yang merupakan ukuran rasio total biaya pembangkit secara generik (modal kapital dan operasional), dengan jumlah total listrik yang diharapkan dihasilkan selama periode pembangkit beroperasi. LCOE sebagai metrik relatif sederhana dan transparan, sehingga banyak dijadikan bahan rujukan.



**Gambar 109** Biaya Sistem Jaringan untuk Teknologi *dispatchable* dan Tebarukan (sumber: OECD Nuclear Energy Agency, 2018) (World Nuclear Association, 2022b)







Namun, kemampuan LCOE untuk menilai keseluruhan biaya bagi pembangkit dan aspek penunjang lainnya masih terbatas. Pada prakteknya di pasar yang dideregulasi, pendapatan yang bersifat tidak pasti selama masa operasi membuat metrik menjadi kurang relevan; dan metrik LCOE tersebut tidak dapat secara sempurna menangkap biaya sistem teknologi yang sangat bervariasi. Biaya sistem selalu ada, tetapi pertumbuhan sumber energi terbarukan variabel telah mempromosikan topik tersebut dalam beberapa tahun terakhir. Biaya sistem mencakup pengeluaran yang diperlukan untuk distribusi dan transmisi, dan yang paling penting, cadangan untuk variabilitas inheren dari beberapa energi terbarukan seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 133**. Energi nuklir kompetitif dalam biaya berdasarkan perbandingan LCOE sederhana, terutama dengan tingkat diskon biaya kapital yang rendah. Karakteristik nuklir lainnya yang unggul adalah dapat menyediakan pasokan energi yang stabil dengan rendah emisi karbon yang dapat diprediksi dan andal. Hal ini dapat dikatakan bahwa apabila dimasukkannya biaya sistem dan eksternalitas secara nyata meningkatkan harga keterjangkauan relatif bagi energi nuklir (World Nuclear Association, 2022b).



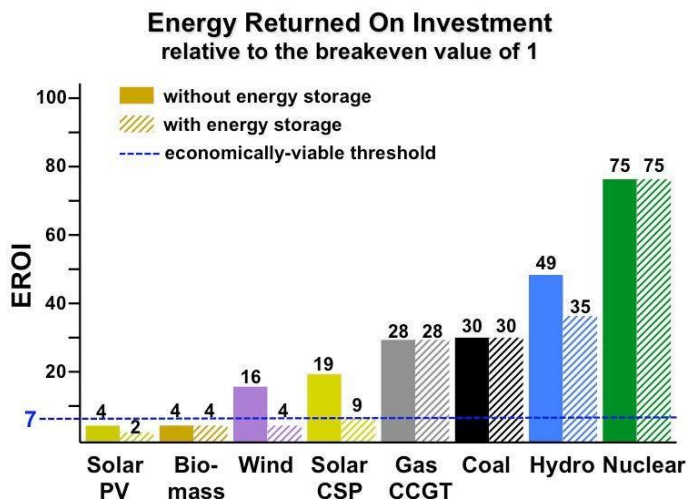
**Gambar 110** Perbandingan Tingkat pertumbuhan Listrik dan Keberlanjutan Listrik Rendah Karbon (Cao et al., 2016; Thoughtscapism, 2017)

Perbandingan biaya listrik antarnegara bervariasi dan diperumit oleh faktor spesifik negara masing-masing. Akan tetapi, perbandingan negara yang sama menghasilkan kesimpulan yang serupa. Pertumbuhan energi nuklir di Jerman selama tahun 1975–1985 memperlihatkan bahwa produksi listrik kilowatt-jam rendah emisi karbon lebih dari dua kali lipat dibandingkan dengan tingkat gabungan penambahan energi matahari dan energi angin di Jerman selama dekade terakhir (2004-2014) seperti digambarkan pada **Gambar 134**. Demikian pula, penambahan energi nuklir di AS pada tahun 1981–1991 meningkatkan listrik rendah karbon dua kali lebih cepat dari pertumbuhan energi surya dan angin selama dekade terakhir (2004-2014). Peningkatan pertumbuhan energi surya dan angin dalam tingkat penyebaran matahari dan angin dapat terjadi lebih lanjut di banyak negara. Akan tetapi bukti yang tersedia tidak mendukung anggapan bahwa nuklir secara inheren lebih lambat daripada energi terbarukan dalam hal peningkatan skala listrik rendah karbon. Berdasarkan data statistik yang ada, hingga saat ini hanya tenaga nuklir yang menghasilkan tingkat pertumbuhan listrik rendah karbon yang tinggi dan berkelanjutan yang akan dibutuhkan untuk memenuhi tujuan dekarbonisasi pada pertengahan abad seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 136** dan biaya rendah serta energi operasi jangka panjang seperti yang disebutkan pada **Gambar 135**, serta untuk nilai pengembalian investasi pada **Gambar 136** yang menunjukkan nuklir memiliki pengembalian tertinggi yang ditunjukkan oleh nilai Energy Return

of Investment (EROI) dari energi nuklir yang sangat tinggi *disbanding* energi lainnya (Cao et al., 2016; Thoughtscapism, 2017; Weißbach et al., 2013).

	 Nuclear Korea	 Nuclear Finland	 Wind EU Onshore	 Wind EU Offshore	 Solar PV Germany
 Capital, billion €/GWe	2.0	3.4	1.6	3.3	1.4
Capacity factor	90%	90%	25%	40%	10%
Lifetime (years)	60	60	20	20	25
<b>Capital, cents/kWh</b>	<b>0.4</b>	<b>0.7</b>	<b>3.7</b>	<b>4.7</b>	<b>6.2</b>

Gambar 111 Perbandingan beberapa aspek ekonomi listrik rendah karbon (Thoughtscapism, 2017).



Gambar 112 Perbandingan *Energy Returned on Investment* (EROI) Berbagai Energi (Conca, 2015; Weißbach et al., 2013).

Menjadi semakin penting dan prioritas untuk dapat membedakan antara motivasi negara-negara yang melakukan transisi energi dari fosil ke nuklir karena alasan perubahan iklim dan mereka yang bertransisi atau mengadopsi nuklir karena alasan lain. Fokus di sini adalah pada negara-negara yang mentransisikan atau membangun pembangkit listrik tenaga nuklir (atau PLTN) dan negara-negara yang tertarik untuk mengadopsi energi nuklir untuk pertama kalinya tetapi belum memulai proses konstruksinya. Kecenderungan utama dalam motivasi energi nuklir terkait dengan

perubahan iklim, keamanan energi, dan hubungan luar negeri. Motivasi perubahan iklim secara konsisten untuk mencapai emisi karbon yang lebih rendah atau mencapai target nol emisi karbon dengan tenggat waktu yang diberikan. Motivasi ketahanan energi kurang konsisten tetapi mencakup kehati-hatian terhadap ketergantungan impor dari penyedia energi asing, ketergantungan pada bahan bakar fosil, dan keinginan untuk mengontrol pasokan listrik. Motivasi terkait dengan hubungan luar negeri termasuk menggunakan listrik yang dihasilkan dari energi nuklir untuk keuntungan ekspor keuangan, mendapatkan pengaruh atas klien, dan mendapatkan prestise internasional melalui kemajuan teknologi (Davidson, 2022).

#### **4.5.4 Keamanan Energi**

Selain daya tarik intensitas karbon yang lebih rendah, peningkatan energi nuklir sebagai salah satu kandidat utama penyesuaian bauran energi pembangkit listrik juga didukung oleh relatif mudahnya akses secara finansial dan geografis. Salah satu fitur paling menarik dari energi nuklir adalah stabilitas pasokan bahan bakarnya dan konsistensi pasokan listrik meskipun kondisi cuaca buruk dan ketidakstabilan politik. Negara-negara yang menekankan manfaat keamanan atau stabilitas energi nuklir sebagai pasokan listrik yang stabil, sebagai listrik yang bersumber dari dalam negeri, atau sebagai yang terjangkau secara finansial, mencakup semua negara yang saat ini membangun reaktor nuklir dengan desain yang berasal dari pemasok asing atau impor. Ketahanan energi juga dapat didefinisikan sebagai kemampuan suatu negara untuk menentukan pembangkit listriknya atau, sebagai penurunan atau ketergantungan proporsional pada aktor luar atau asing. Ketahanan energi selanjutnya memiliki arti yang berbeda tergantung pada aktornya. Mantan direktur IEA, Maria van der Hoeven, pernah menggambarkan bahwa ketahanan energi sebagai (bagi negara pengekspor), tentang '...keamanan permintaan, bagi negara pengimpor tentang keamanan pasokan'. Jadi, untuk negara-negara pengekspor energi, ketahanan energi berbicara tentang ketahanan pasar untuk ekspor khusus mereka, sedangkan untuk negara-negara pengimpor energi, hal itu memerlukan pasokan eksternal yang dapat diandalkan untuk dibeli. Negara-negara yang membangun reaktor dengan desain asing yang menganggap energi nuklir berperan dalam ketahanan energinya antara lain Slovakia, Belarusia, Cina, Finlandia, Iran, Pakistan, Turki, Ukraina, dan UEA. Sifat energi nuklir sebagai

sumber listrik domestik yang memungkinkan swasembada energi tampak menarik bagi negara-negara nuklir baru. Hal ini dapat diamati dengan Slovakia yang berusaha untuk memenuhi sendiri pasokan listrik domestiknya dan Belarusia yang mengurangi ketergantungannya pada impor gas dengan pembangunan PLTN. Menurut buku putih terbaru yang diterbitkan oleh Dewan Negara Cina, Cina menerapkan reaktor nuklir baru yang diimpor untuk memperkuat ketahanan sektor energinya. Finlandia menekankan bahwa energi nuklir akan 'mengurangi ketergantungan impor energi' dan berkontribusi pada keamanan pasokan listrik, terutama selama bulan-bulan musim dingin. Stabilitas dan keandalan pasokan listrik dari energi nuklir tampaknya juga menjadi titik kunci khususnya, dengan Iran, Pakistan, Turki, Inggris, dan UEA menekankan 'listrik yang andal', pasokan listrik yang 'aman', keamanan pasokan energi, 'pembangkit listrik yang andal', dan karakterisasi serupa lainnya dari peran reaktor baru di negaranya masing-masing (Davidson, 2022).

Mengacu pada proses dinamika internasional terkait industri nuklir dan turunannya, antara sisi pemasok teknologi dan bahan bakar, juga sisi konsumen, dan kaitannya dengan negara, dan juga terkait rezim regulasi nuklir internasional, telah banyak memberikan tingkat pengaruh geopolitik yang lebih besar kepada negara atau organisasi pemasok reaktor daripada negara pemasok/konsumen. 'Keterlibatan lebih jauh dan mendalam' pemerintah dalam hubungan program energi nuklir, secara spesifik dan khusus serta lebih substansial daripada hubungan komersial dan perusahaan dalam bentuk hubungan arus utama produksi dan kaitannya dengan konsumsi energi. Hal ini terjadi dan dilakukan dikarenakan negara sebagai entitas organisasi resmi dan berkuasa memiliki tanggung jawab untuk memastikan pengaturan dan penanganan bahan nuklir dan bahan radioaktif yang tepat. Lebih jauh lagi menjadikan negara sebagai pemain kunci dan pembuat keputusan dalam hubungan program energi nuklir untuk tujuan sipil. Mengacu pada kajian terkait hubungan antara kebijakan luar negeri negara dan industri nuklir menemukan bahwa 'pengaruh kebijakan luar negeri' dan 'hubungan komersial nuklir' terkait: perdagangan nuklir 'berfungsi untuk menciptakan atau mempertahankan hubungan diplomatik, komersial, dan kelembagaan.' Pasokan industry nuklir secara internasional untuk program energinya membutuhkan sisi pemerintah atau negara yang tidak hanya untuk berkomunikasi tetapi juga dapat bekerja sama dan



bersinergi, berinovasi, dan mempertahankan seluruh upaya program energi nuklirnya berjalan selama bertahun-tahun (Davidson, 2022). Oleh karena itu diperlukan beberapa program atau tahapan kebijakan di antaranya:

1. Adanya struktur akuntabilitas dan pengawasan,
2. Adanya regulasi berupa peraturan yang kuat dan dapat diimplementasikan (baik internasional maupun domestik),
3. Program pengelolaan sampah, manajemen dan penyimpanannya
4. Terciptanya dan terpeliharanya norma keamanan internasional dan regional (ini signifikan terutama di Eropa Timur akibat bencana Chernobyl),
5. Adanya negosiasi pembayaran dan pinjaman,
6. Memperkuat program pertukaran personel dan pelatihan, dan
7. Diperlukan penegakan standar keselamatan oleh kedua negara yang terlibat dan oleh asosiasi energi nuklir internasional dan organisasi multilateral seperti IAEA.

Hal menarik dalam industri nuklir khususnya dalam industri internasional dan kaitannya dengan geopolitik dan strategis ekonomi dunia terkait isu hegemoni kekuatan energi dan ekonomi, diperlukan sebuah kepastian rezim atau organisasi yang dapat menyakinkan bahwa keberlangsungan dan komitmen yang kuat industry nuklir. Dalam hal ini hubungan program energi nuklir antar pemerintah menjadi sangat kondusif untuk meningkatkan kerja sama ketika perusahaan komersial yang terlibat adalah milik negara, seperti Rosatom. Perusahaan milik negara menjadi pilihan yang lebih realistic untuk mengelola industry strategis seperti nuklir, demikian pula di Indonesia juga dapat diperkenalkan dengan kontribusi BUMN atau bada usaha milik negara sebagai pemain kunci dengan kerja sama dengan pihak-pihak terkait khususnya untuk proyek awal pembangunan. Apabila pihak swasta ataupun asing berkeinginan masuk dalam industri nuklir, diperlukan sinergi dan kolaborasi dengan perusahaan milik negara sebagai bagian dari Kerja sama yang lebih kuat dan terkontrol. Hal ini, dikombinasikan dengan kesadaran bahwa sponsor swasta saja tidak memungkinkan persaingan untuk energi nuklir di pasar bebas, kini mendorong eksportir baru, seperti Amerika Serikat, untuk menyesuaikan pendekatan mereka terhadap ekspor teknologi energi nuklir. Argumen bahwa vendor teknologi reaktor nuklir kadang-kadang berusaha untuk menciptakan ketergantungan oleh klien paling sering dibuat melawan

Rosatom dan korporasi energi nuklir milik negara Cina. Niat seperti itu jarang, jika pernah, diakui oleh negara Rusia dan Cina atau perusahaan yang mereka sponsori dan miliki, tetapi apa yang disebut 'ekspor energi strategis' tercatat semakin sering digunakan sebagai instrumen kebijakan luar negeri. Oleh karena itu penting untuk mengeksplorasi masalah ini sebagai motivasi potensial untuk menjual reaktor nuklir ke luar negeri (Davidson, 2022).

#### 4.6 Penyedia Teknologi Reaktor Nuklir

Berkenaan dengan penyedia atau vendor teknologi, tentunya akan terkait dengan tipe teknologi yang akan digunakan dan juga terkait suplai bagian-bagian reaktor yang dibutuhkan sampai pada suplai bahan bakar yang diyakinkan dapat aman digunakan sampai rencana reaktor beroperasi. Di dalam teknologi reaktor nuklir, saat ini, jenis reaktor yang paling umum digunakan adalah reaktor air bertekanan (*PWR/Pressurized Water Reactor*). Perbedaan utama reaktor saat ini bukan antara reaktor itu sendiri melainkan antara paket yang melingkupinya. Dalam PWR teras reaktor menghasilkan panas melalui proses fisi nuklir dan didinginkan oleh air bertekanan tinggi (~150-160 bar), suhu tinggi (~275 °C). PWR yang saat ini sedang dibangun dan sebagian besar yang saat ini digunakan untuk pembangkitan listrik dianggap sebagai reaktor Generasi III dan III+. Untuk memperjelas, reaktor Generasi I dikembangkan pada 1950-an dan 1960-an dan tidak lagi dikembangkan atau digunakan saat ini seperti digambarkan pada Gambar 108. Reaktor Generasi II termasuk yang tidak lagi dibangun tetapi masih digunakan, dan sebagian besar mencapai harapan hidup mereka. Reaktor generasi IV saat ini sedang dikembangkan tetapi belum beroperasi secara komersial. Mereka beroperasi pada suhu yang lebih tinggi daripada reaktor Generasi III dan banyak yang didinginkan oleh natrium cair atau timbal, garam cair, atau gas, bukan oleh air. Untuk keperluan laporan ini, saya akan fokus pada reaktor Generasi III mengingat keberadaannya yang dominan di pasar ekspor nuklir saat ini. Mereka biasanya memiliki kapasitas operasi seumur hidup enam puluh tahun. Hanya enam negara (Rusia, Amerika Serikat, Prancis, Jepang, Cina, dan Korea) menyumbang ~ 94% dari pemasok teknologi nuklir global. Selain Jepang, mereka semua mampu mengekspor pembangkit listrik tenaga nuklir. Dukungan negara berarti banyak hal dalam industri nuklir, di antaranya adalah subsidi yang signifikan dan sumber pendanaan yang terjamin. Dukungan negara untuk program ekspor nuklir dianggap kunci untuk

mencapai daya saing di pasar internasional, dan keterlibatan negara dalam mendukung industri tenaga nuklir secara keseluruhan selalu penting (Davidson, 2022).

Mengenai masalah manajemen, program PLTN di Indonesia ditentukan oleh skema pembiayaan seperti yang dapat dikelola oleh perusahaan negara, atau oleh perusahaan swasta atau beberapa korporasi lainnya. Misalnya, Badan Usaha Milik Negara (BUMN) akan menjadi Pemilik PLTN atau dapat menjadi Perusahaan Listrik Negara (PT PLN) akan bertindak sebagai utilitas. Masalah pendanaan dapat merupakan kombinasi dari pinjaman jangka panjang dan ekuitas serta risiko keuangan NPP harus dievaluasi seperti proses penundaan dan pembengkakan biaya selama proses pembangunan dan konstruksi. Masalah jaringan listrik harus dihubungkan dengan jaringan listrik yang ada dan yang akan datang seperti jaringan nasional sistem Jawa-Madura-Bali yang dapat mencakup aliran daya, stabilitas transien, dan sistem jaringan. Isu lain seperti Sumber Daya Manusia, Pelibatan Pemangku Kepentingan, Pelibatan Pemangku Kepentingan, Perlindungan Lingkungan, Perencanaan Darurat, Keamanan, Siklus Bahan Bakar Nuklir, Limbah Radioaktif, Pelibatan Industri harus dilaksanakan secara bertahap dan serentak. Masalah terakhir adalah Pengadaan. Ini juga merupakan masalah yang sangat penting yang dapat dibentuk oleh Tim Pengadaan khusus oleh pemerintah. Menurut Keputusan Presiden No. 80 Tahun 2003 yang meliputi pengadaan barang dan jasa oleh perusahaan swasta. Oleh karena itu, tidak menutup kemungkinan pengadaan barang-barang tersebut akan dilaksanakan oleh pihak swasta. Semua pemangku kepentingan dapat berpartisipasi untuk merangkul industri nasional dalam program energi nuklir yang dapat memberikan dukungan yang baik untuk konstruksi dan layanan seperti pembangkit listrik konvensional saat ini.

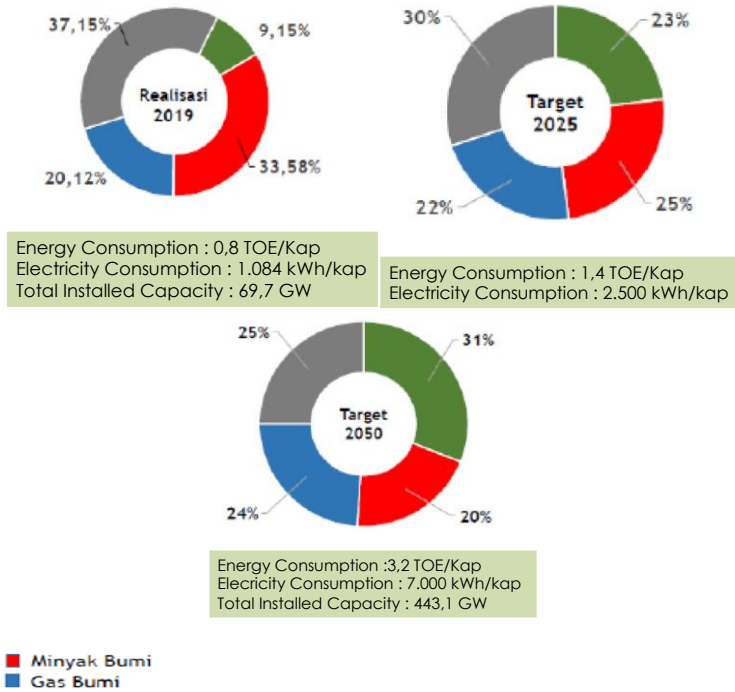
Dalam kasus di Indonesia, tidak seperti di yurisdiksi lain, untuk menggunakan perjanjian jual beli listrik (PPA) korporasi langsung tidak dapat diterapkan di Indonesia. Untuk perjanjian jual beli listrik karena hanya perusahaan listrik milik negara PT PLN (Persero) (PLN) dan pengembang listrik swasta yang memiliki persetujuan wilayah bisnis terkait yang dapat menjual listrik ke pelanggan akhir. Akibatnya, ada persepsi umum di kalangan pengembang dan korporasi bahwa tidak mungkin menerapkan struktur PPA korporasi di Indonesia. Kenyataannya, tidak demikian, dan karena Pemerintah Indonesia sangat mendorong salah satunya skema

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap. Diperkirakan ke depan akan adanya peningkatan struktur yang memungkinkan pengembang swasta untuk mengatur pembangkitan listrik bagi pelanggan. Dalam kasus produsen energi nuklir, PPA di Indonesia dapat diterapkan sebagai pendekatan kemitraan antara PLN dan pengembang swasta, bukan mengarahkan PPA korporasi.

#### **4.7 Evaluasi Program *Net Zero Emission* (NZE)**

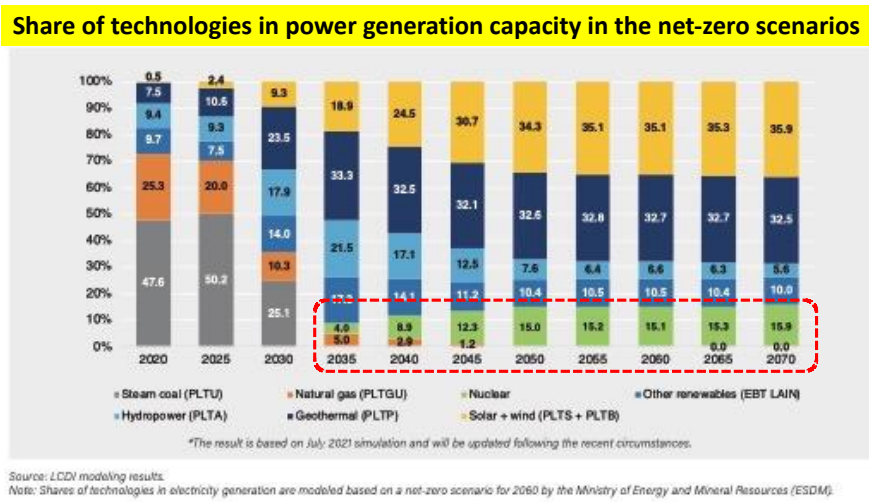
Seperti terlihat pada **Gambar 137** realisasi Pemanfaatan Energi Baru dan Terbarukan (EBT) sekitar 9,15% (2019), dan diperlukan lebih banyak program untuk meningkatkan kontribusi EBT dan dapat memenuhi target kebijakan energi nasional sebesar 23% pada tahun 2025, serta ditargetkan pemenuhan EBT di tahun 2050 sekitar 31%, berdasarkan tahapan transisi 2019, 2025, dan 2050 kementerian ESDM. Beberapa alternatif sumber EBT perlu diadopsi dan dimanfaatkan lebih banyak termasuk nuklir. Mempromosikan pemanfaatan pembangkit listrik tenaga nuklir dapat menjadi salah satu isu terbaik untuk mengisi kesenjangan pembangkit energi yang ditargetkan pada tahun 2035 serta target masa depan pada tahun 2050 (ESDM, 2021). Untuk mencapai pembangkit listrik tenaga nuklir yang beroperasi antara tahun 2035-2040 dan lebih, PLTN harus mulai dibangun sebelum tahun 2030 atau bisa lebih awal jika permintaan meningkat dan EBT lainnya dapat mengisi kesenjangan ketika kontribusi bahan bakar fosil berkurang.

Terlihat pada **Gambar 138** untuk program net-zero emission bahwa pada tahun 2035, PLTN memiliki kontribusi akumulasi sebesar 4%. Artinya 4% PLTN harus *on grid* pada tahun 2035. PLTN yang lebih awal beroperasi diperlukan untuk memberikan kontribusi yang meningkat dari 4% pada tahun 2035 dan akan meningkat seiring waktu, dan akhirnya mencapai sisa 16-18% pada tahun 2060. Sebelum tahun 2035 itu berkontribusi 4% dari bauran energi sebagai akumulasi, tenaga nuklir harus beroperasi mulai tahun 2030-2031 dengan kontribusi 1%, dan meningkat secara bertahap 1% dari tahun ke tahun untuk mencapai 4% pada tahun 2035 dan akan meningkat drastis pada tahun 2060 sebesar 16-18% kontribusi, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 139 dan 140**.

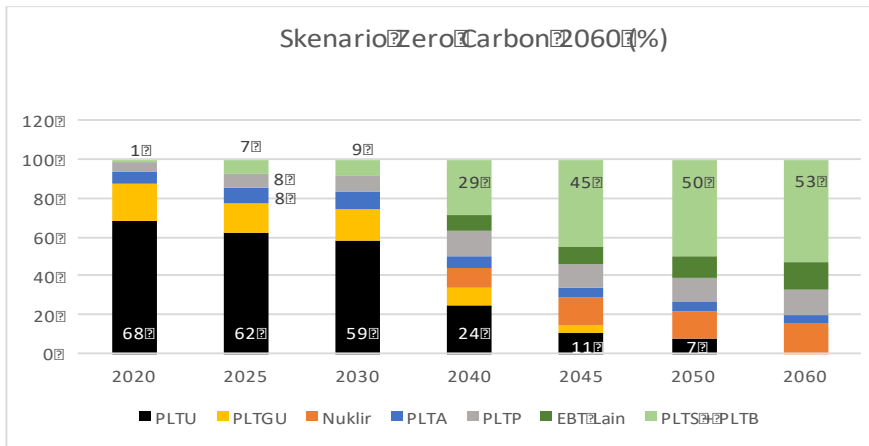


Sumber : ESDM/MEMR

**Gambar 113** Target Skenario Beberapa Tahap Transisi 2019, 2025 dan 2050 (MEMR, 2021)

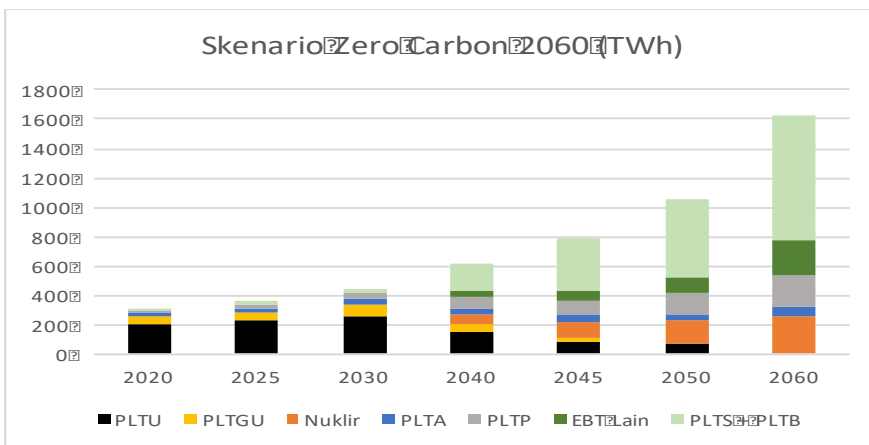


**Gambar 114** Bauran Teknologi Dalam Kapasitas Produksi Listrik Dalam Skenario NZE 2020-2070 (MEMR, 2021).



**Gambar 115** Komposisi Bauran Energi Setiap Sumber Dalam Skenario *Net-Zero* 2020-2060 (MEMR, 2021).

Seperti ditunjukkan pada **Gambar ??**, program dekarbonisasi sektor ketenagalistrikan, meningkatkan pangsa energi baru dan terbarukan dalam kapasitas pembangkit sekitar 18% pada tahun 2020, yang sebagian besar berasal dari tenaga air, panas bumi, dan biomassa. Dan itu meningkatkan komposisi EBT menjadi 82% pada tahun 2053 (di seluruh skenario) dan menambah kapasitas nuklir, mulai tahun 2030 dan meningkat secara bertahap hingga tahun 2060 dan seterusnya (MEMR, 2021).



**Gambar 116** Komposisi Bauran Pembangkit Listrik Dalam Skenario *Net-Zero* 2020-2060 (MEMR, 2021).

Pada akhir tahun 2060, diperkirakan produksi daya penuh dari semua listrik berasal dari sumber bersih sumber energi baru dan terbarukan seperti pada **Gambar 140**, dengan target 1600 TWh. Sejak Kementerian Energi dan

Sumber Daya Mineral (ESDM) dan Dewan Energi Nasional Indonesia (DEN) serta PLN telah membahas dan mencanangkan program zero net CO2 emission pada tahun 2060, belum ada pernyataan untuk implementasi di merinci program bagaimana mencapai perkiraan produksi listrik terutama dalam hal kontribusi NPP dalam program Net Zero Emission (NZE).

#### **4.7.1 Perlunya Detail Program Implementasi Energi Nuklir dalam Program NZE**

Dalam program NZE, energi nuklir sebagai bagian dari energi baru dan terbarukan berkontribusi pada bauran energi nasional mulai tahun 2040 dan peta jalan lain dari pengumuman dewan energi nasional akan dimulai pada tahun 2035 untuk kontribusi NPP. Estimasi *road map* yang berbeda akan menimbulkan kebingungan bagi masyarakat, sehingga diperlukan harmonisasi program yang melibatkan semua stakeholder. Ketika program PLTN telah ditetapkan dimulai pada tahun 2040 untuk kapasitas listrik sekitar 10 GWe, berarti pada tahun 2040 sudah ada beberapa unit PLTN yang menghasilkan 10 GWe masuk dalam jaringan. Jika pembangkit listrik yang dapat beroperasi setiap tahunnya adalah 1 GWe, berarti untuk 10 GWe dibutuhkan waktu 10 tahun secara berurutan pembangunan unit pembangkit listrik. Skenario lain untuk beberapa unit setiap tahun di jaringan dapat diadopsi, Misalnya setahun menghasilkan 2 GWe yang berarti untuk 10 GWe, dibutuhkan waktu konstruksi paralel 5 tahun. Berdasarkan statistik bahwa untuk membangun PLTN kelas 1 GWe, membutuhkan waktu pembangunan sekitar 5-7 tahun, diperkirakan waktu yang diperlukan pada tahun 2030-2032 PLTN harus beroperasi untuk kelas PLTN 1 GWe pertama untuk satu unit. Atau unit ganda di jaringan setiap tahun. Oleh karena itu, dengan memasukkan waktu pembangunan, untuk mencapai waktu operasi pada tahun 2030-2032, PLTN harus dibangun pada tahun 2024-2026. Selain itu, untuk tahap persiapan serta perizinan membutuhkan waktu 2-3 tahun. Dalam hal ini implementasi program harus dimulai pada tahun 2022-2023 serta pernyataan nasional untuk *go nuclear* harus dinyatakan. Segera dilakukan program dan organisasi untuk melaksanakan program energi nuklir di Indonesia. Program nuklir harus dilaksanakan mulai dari perencanaan, persiapan dan investasi serta penyiapan sumber daya manusia dan beberapa infrastruktur lain untuk program energi nuklir.

## 4.7.2 Analisis Produksi Listrik berbasis Faktor Kapasitas Pembangkit

$$ElecPro = Pow * CF * AnTime * (1 - Loss) \quad (1)$$

Analisis dasar produksi listrik berdasarkan persamaan (1) berikut yang diturunkan dari faktor ketergantungan kapasitas. Persamaan (2) didefinisikan untuk setiap produksi listrik sumber energi. ElecPro didefinisikan untuk Produksi Listrik dari Potensi *Renewable Energy* (RE) [dalam TWh], variabel *Pow* sesuai dengan Kapasitas Daya [dalam GWe] yang bergantung pada Potensi energi, simbol CF disebut *Capacity Factor* (CF) (Statista, 2021) dengan unit berdimensi [-] dan tergantung pada sumber energi. Simbol *AnTime* digambarkan sebagai waktu tahunan jam [satuan jam] sebagai akumulasi 24 jam waktu 365 hari yang sama dengan 8760 Jam. Dan simbol terakhir adalah *Loss* yang merupakan simbol *Loss Transmisi-Distribusi* [satuan %] yang dipilih 10 % *loss* untuk besarnya *loss* semua sumber energi.

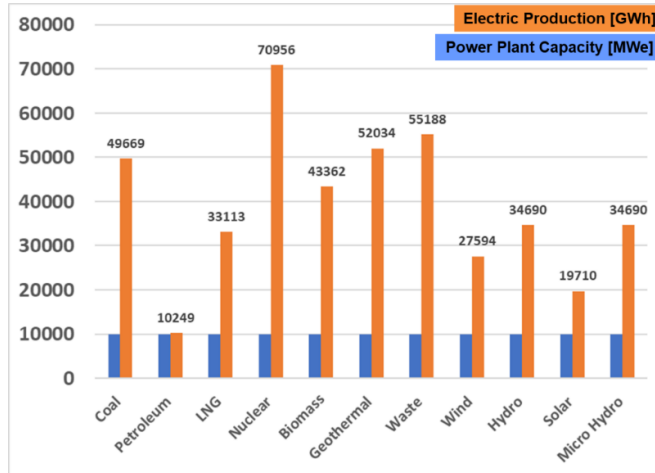
$$ElecPro(i) = Pow(i) * CF(i) * AnTime * (1 - Loss) \quad (2)$$

*i* : each energy source

Sebagai konsep umum untuk semua pembangkit listrik bahwa konsep kapasitas daya terpasang berbeda dengan konsep produksi listrik. Dari pembangkit listrik. Konsep ini akan membawa penerapan nyata pemanfaatan listrik bahwa produksi listrik dari pembangkit listrik adalah tingkat energi nyata sebagai kebutuhan atau beban listrik. Sesuai dengan faktor kapasitas masing-masing pembangkit yang berbeda satu sama lain, maka akan menghasilkan listrik untuk tingkat produksi listrik yang berbeda untuk kapasitas daya terpasang yang sama. Produksi listrik adalah satu tahun berdasarkan berbagai faktor kapasitas pembangkit listrik untuk faktor kapasitas yang berbeda. Untuk simulasi, bila masing-masing pembangkit memiliki kapasitas terpasang yang sama, misalnya memiliki kapasitas terpasang 10.000 MWe.

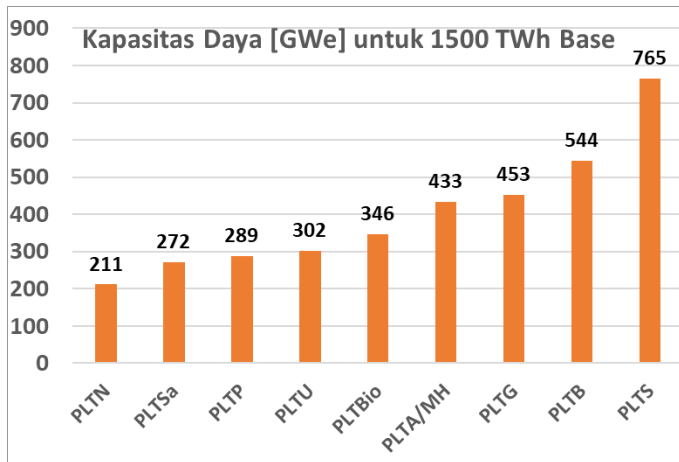


## Electric Production for 10 GWe Power Capacity of Each Power Plant



**Gambar 117** Produksi Listrik Berbasis 10 GWe Terpasang Setiap Pembangkit (permana et al., 2022)

Dengan menggunakan faktor kapasitas selama satu tahun jam (*year-hour*), dapat diperkirakan produksi listrik untuk setiap pembangkit listrik dalam satuan GWh atau TWh seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 141**. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) untuk faktor kapasitas tertinggi selama lebih dari 90% menghasilkan produksi listrik tertinggi yaitu lebih dari 70.956 GWh dari kapasitas daya terpasang 10.000 MWe. Pembangkit listrik lain misalnya pembangkit listrik batubara menghasilkan sekitar 50.000 GWh yang didasarkan pada pembangkit listrik batubara sekitar 60% CF. Seperti pembangkit listrik fosil, energi baru dan terbarukan menunjukkan variasi CF yang menunjukkan faktor kapasitas tertinggi adalah pembangkit listrik tenaga nuklir sekitar lebih dari 90% CF dan diikuti oleh panas bumi sekitar 66% CF dan seterusnya.



**Gambar 118** Kebutuhan Kapasitas Daya Pembangkit Terpasang Untuk Produksi Listrik 1500 TWh (permana et al., 2022)

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) merilis proyeksi energi target dan Program Net Zero Emission 2060 yang diproyeksikan pada tahun 2060, Indonesia membutuhkan 1885 Terawatt Hours (TWh), yaitu 1728 TWh dari PLN dan 157 TWh dari non-PLN (ESDM). , 2021). Perlu tambahan energi sekitar 1500 TWh karena produksi listrik yang ada saat ini sekitar 300 TWh. Ini akan meningkat 5 kali lebih tinggi untuk produksi energi tambahan pada tahun 2060 dibandingkan dengan status saat ini (PLN, 2021). **Gambar 142** menunjukkan kapasitas terpasang yang diperlukan untuk menghasilkan 1500 TWh untuk setiap pembangkit listrik untuk satu penghasil energi. Seperti yang telah disebutkan pada sesi sebelumnya bahwa setiap pembangkit listrik menghasilkan produksi listriknya dari kapasitas daya terpasangnya, dan akan menghasilkan tingkat listrik yang berbeda berdasarkan faktor kapasitasnya. Gambar perkiraan kapasitas daya yang dibutuhkan untuk menghasilkan 1500 TWh untuk setiap pembangkit listrik dan ini menunjukkan PLTN memberikan kapasitas daya yang lebih kecil untuk menghasilkan 1500 TWh yang dibutuhkan dibandingkan dengan pembangkit listrik lainnya dan kapasitas daya tertinggi yang dibutuhkan adalah pembangkit listrik tenaga surya PV.

$$Pow = \frac{ElecPro}{CF * AnTime * (1 - Loss)} \quad (3)$$

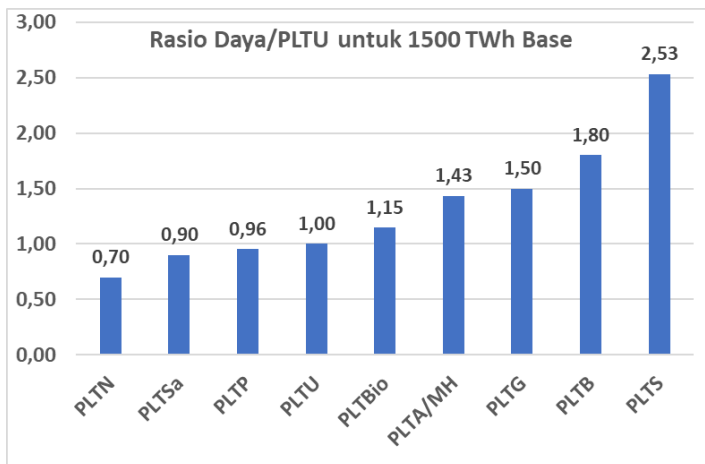
$$Pow(i) = \frac{ElecPro}{CF * AnTime * (1 - Loss)} \quad (4)$$

*i* : each energy source

Persamaan (3) dapat digunakan untuk menghitung kapasitas daya dari produksi listrik, dan untuk sumber energi individual, tersedia persamaan (4). Berdasarkan 1500 TWh sebagai perkiraan tambahan kebutuhan energi akan diberikan oleh campuran komposisi energi dari berbagai produksi energi yang terutama dari energi baru dan terbarukan (EBT) atau semuanya menjadi kontribusi RNE untuk mencapai emisi nol bersih yang ambisius pada tahun 2060 atau bahkan lebih cepat. Penambahan 1500 TWh untuk perkiraan permintaan pada tahun 2060 akan dipengaruhi oleh permintaan kapasitas daya yang dibutuhkan untuk masing-masing pembangkit. Simulasi untuk menghasilkan 1500 TWh dilakukan untuk berbagai pembangkit listrik di mana masing-masing pembangkit harus memiliki kapasitas daya yang seharusnya menghasilkan 1500 TWh hanya berdasarkan pasokan 100% pembangkit tunggal. Simulasi menunjukkan bahwa pembangkit listrik tenaga nuklir membutuhkan kapasitas terpasang paling rendah sebesar 211 GWe diikuti oleh pembangkit listrik tenaga sampah, panas bumi dan sebagainya, dan pembangkit listrik tenaga surya PV akan membutuhkan kapasitas terpasang tertinggi sekitar 765 GWe untuk menghasilkan produksi listrik 1500 TWh seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 150**.

Kapasitas daya terpasang yang dibutuhkan untuk setiap pembangkit untuk menghasilkan listrik sebesar 1500 TWh adalah ketersediaan dan kemampuan pembangkit untuk memaksimalkan kemampuan produksi listriknya dari kapasitas daya terpasang. **Gambar 143** menunjukkan rasio masing-masing kapasitas terpasang terhadap kapasitas terpasang PLTU Batubara untuk memproduksi 1500 TWh. Pembangkit listrik batubara digunakan sebagai basis karena pembangkit listrik yang ada pada tahap sekarang sebagai pembangkit listrik yang dominan. Rasio PLTN (0,7), PLTSa (0,9) dan PLTP (0,96) memiliki rasio kurang dari 1 yang berarti kapasitas terpasang lebih kecil dari PLTU batubara untuk menghasilkan produksi listrik yang sama dan pembangkit lainnya memiliki rasio lebih tinggi dari 1 dibandingkan dengan tenaga batubara. Rasio yang lebih besar dari 1 berarti pembangkit listrik membutuhkan kapasitas terpasang yang lebih besar daripada pembangkit listrik batubara untuk menghasilkan tingkat produksi listrik yang sama. Dapat dilihat dari rasionya, bahwa pembangkit listrik tenaga nuklir memiliki rasio terendah (0,7) dan solar PV memiliki rasio tertinggi (2,52) dibandingkan dengan pembangkit batubara serta rasio

pembangkit listrik tenaga angin adalah 1,8 dan pembangkit listrik tenaga air adalah 1,43.



**Gambar 119** Rasio Kapasitas Daya Pembangkit Terhadap Batu Bara Untuk Produksi 1500 TWh (permana et al., 2022)

#### 4.8 Evaluasi Biaya Produksi Listrik Reaktor Besar (LCOE)

LCOE adalah alat utama untuk membandingkan biaya produksi listrik tiap unit pembangkit dari berbagai teknologi beban dasar selama masa operasinya. LCOE menunjukkan biaya ekonomi dari teknologi secara umum, bukan biaya keuangan dari proyek tertentu di dalam kondisi pasar tertentu. Dengan nilai diskon tahunan, perhitungan LCOE dimulai dengan Persamaan (5) yang menyatakan persamaan antara nilai sekarang dari jumlah pendapatan yang telah didiskon dan nilai sekarang dari jumlah biaya yang harus dikeluarkan yang juga telah didiskon, termasuk pembayaran kepada penyedia modal. Subskrip  $t$  menunjukkan tahun di mana penjualan produksi atau pengeluaran biaya terjadi. Penjumlahan dimulai dari awal persiapan konstruksi hingga akhir pembongkaran atau dekomisioning, yang mencakup nilai potongan biaya pengelolaan limbah di masa mendatang. Semua variabel adalah biaya estimasi yang bersih dari inflasi. Di bagian kiri perhitungan adalah jumlah manfaat yang sudah didiskon dan di bagian kanan persamaan adalah jumlah biaya yang dikeluarkan yang juga telah didiskon (IEA, 2020):

$$\sum P_{MWh} * MWh * (1+r)^{-t} = \sum (Capital_t + O\&M_t + Fuel_t + Carbon_t + D_t) * (1+r)^{-t} \dots(5)$$

(IEA, 2020)

- PMWh = Biaya konstan yang digunakan selama pembangkit beroperasi bagi pemasok listrik
- MWh = Jumlah listrik yang diproduksi tiap tahun dalam MWh
- $(1+r)^{-t}$  = Diskon tahunan riil terhadap biaya modal
- Capital<sub>t</sub> = Total biaya pembangunan dalam tahun ke-t
- O&M<sub>t</sub> = Biaya operasional dan pemeliharaan dalam tahun ke-t
- Fuel<sub>t</sub> = Biaya bahan bakar dalam tahun ke-t
- Carbon<sub>t</sub> = Biaya karbon dalam tahun ke-t
- D<sub>t</sub> = Biaya dekomisioning/pemberhentian dalam tahun ke-t

Perhitungan LCOE didasarkan pada kesetimbangan neraca nilai sekarang dari jumlah pendapatan yang telah didiskontokan dan nilai sekarang dari jumlah biaya yang dikeluarkan yang telah didiskonkan. Cara lain untuk melihat LCOE adalah dengan mempertimbangkannya sebagai tarif listrik di mana investor akan mencapai titik impas atau breakevent point setelah membayar tingkat pengembalian modal yang disyaratkan, mengingat biaya yang dikeluarkan selama masa pemanfaatan pembangkit. Kesetimbangan pendapatan selama pembangkit beroperasi yang telah didiskontokan dan LCOE didasarkan pada dua asumsi penting:

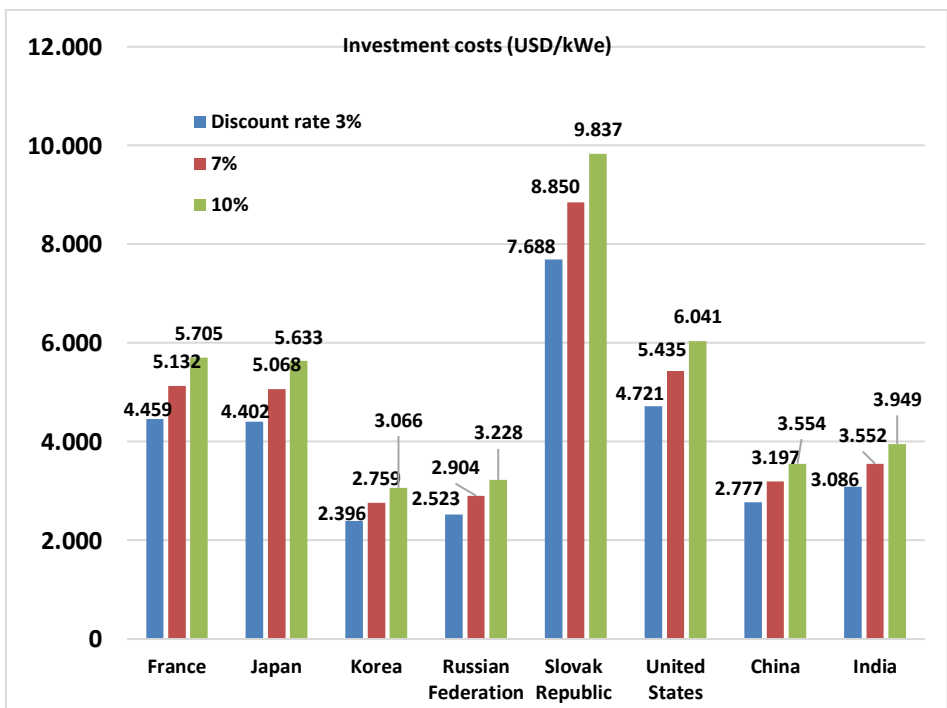
(1) Tingkat diskon riil  $r$  yang digunakan untuk mendiskonkan biaya dan manfaat adalah konstan atau stabil. Sama halnya untuk semua teknologi dan tidak bervariasi selama umur proyek. Berdasarkan EGC 2020 penggunaan diskon mengacu pada kondisi yang berbeda, yaitu menggunakan tingkat diskon 3% akan dilihat sebagai kira-kira setara atau sesuai dengan “biaya modal sosial”, penggunaan tingkat diskon 7% bermakna estimasi sesuai dengan biaya modal utilitas besar di pasar yang dideregulasi atau direstrukturisasi, dan penggunaan tingkat diskon 10% akan bermakna sesuai dengan biaya modal di lingkungan dengan risiko yang relatif lebih tinggi.

(2) Tarif energi listrik, PMWh, diestimasi dalam kondisi konstan, stabil dan tidak berubah selama pemanfaatan pembangkit listrik atau umur pembangkit. Semua output pembangkit, pada faktor kapasitas yang diasumsikan, listrik dijual dengan tarif ini.

Karena PMWh adalah konstanta sepanjang waktu, PMWh dapat dikeluarkan dari penjumlahan, dan Persamaan (1) dapat diubah menjadi :

$$LCOE = P_{MWh} = \frac{\sum(Capital_t + O\&M_t + Fuel_t + Carbon_t + D_t) * (1+r)^{-t}}{\sum MWh (1+r)^{-t}} \quad (6) \text{ (IEA, 2020)}$$

Dengan konstanta PMWh ini didefinisikan sebagai biaya listrik yang diratakan (LCOE). Rumus yang digunakan di sini untuk menghitung rata-rata biaya seumur hidup yang diratakan berdasarkan biaya untuk investasi, operasi dan pemeliharaan, bahan bakar, emisi karbon dan penonaktifan (*dekomisioning*) dan pembongkaran yang disediakan oleh negara OECD dan negara non-anggota OECD yang terpilih. Nilai-nilai yang diselaraskan secara global telah digunakan untuk tingkat diskon, masa teknis operasional, faktor beban fleksibel pembangkit; harga karbon (termasuk faktor emisi karbon bahan bakar, kecuali lignit), durasi konstruksi dan jadwal biaya, biaya dan durasi dekomisioning. Sebaliknya, nilai yang dibedakan secara regional telah digunakan untuk harga bahan bakar (biaya lignit dan bahan bakar nabati bersifat spesifik proyek; biaya siklus bahan bakar nuklir untuk Jepang dan Rusia mencerminkan spesifikasi nasional); faktor beban teknologi terbarukan. Perkiraan waktu operasional pembangkit atau fasilitas untuk setiap teknologi berbagai negara sebagai berikut (IEA, 2020):



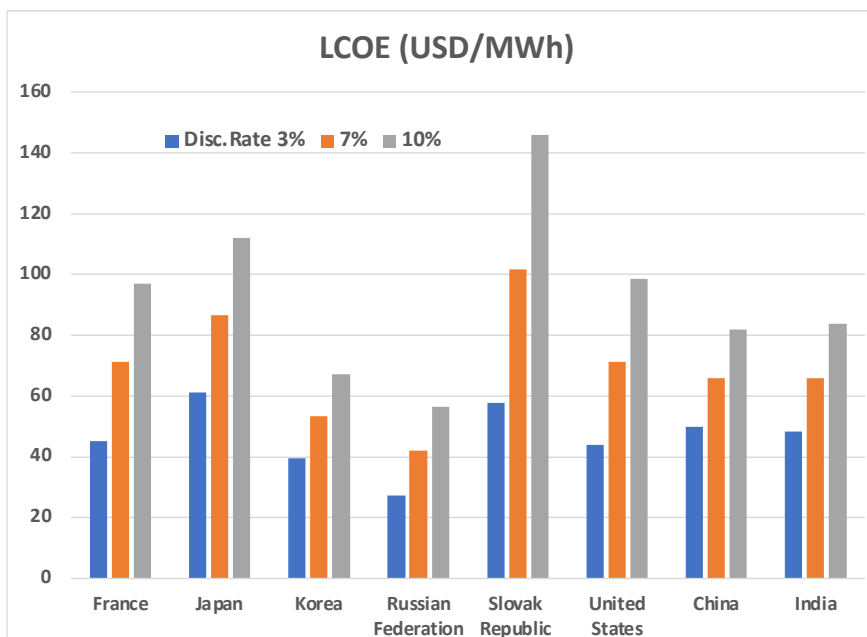
Gambar 120 Biaya Investasi (USD/kWe) Teknologi PLTN, Pembangkit Baru

Tingkat bunga selama konstruksi akan dianalisis berdasarkan pada asumsi beberapa tingkat diskon seperti 3%, 7% dan 10 % yang dapat mengacu

pada tingkat diskon riil  $r$  yang digunakan untuk pembiayaan dan kestabilan manfaat yang diterima. Asumsi diskon yang digunakan dapat menggambarkan kondisi riil seperti tingkat diskon 3% yang menggambarkan kondisi mendekati “biaya modal sosial”, kemudian untuk tipe tingkat diskon 7% dapat digambarkan mendekati kondisi yang kira-kira sama dengan biaya modal utilitas yang besar yang diregulasi atau direstrukturisasi, dan terakhir penggunaan asumsi diskon 10% diperkirakan untuk kondisi yang kira-kira sama dengan biaya modal di lingkungan dengan risiko yang relatif lebih tinggi. Beberapa tipikal dan variasi tingkat diskon akan berimbas langsung dan mempengaruhi nilai biaya investasi seperti yang ditunjukkan **Gambar 144**. Sebagaimana dijelaskan sebelumnya bahwa evaluasi ini berdasarkan data-data yang berasal dari kontribusi dan partisipasi banyak negara dan teknologi pembangkit listrik masing-masing.

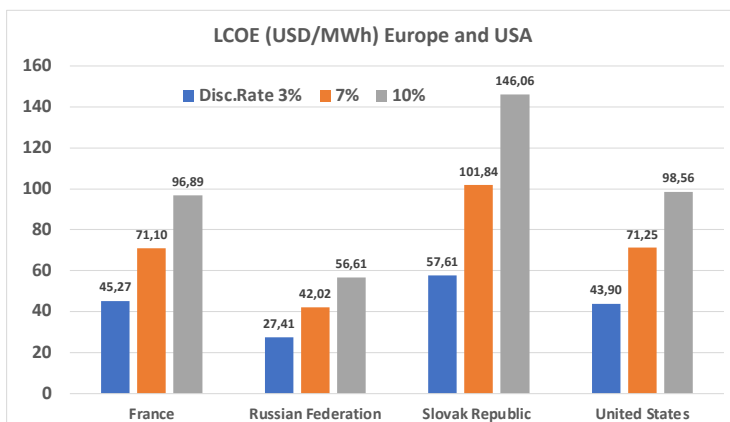
**Tabel 9** Biaya Komponen dan LCOE Beberapa Negara : Pembangkit Baru

Country	Investment (USD/MWh)			Decommissioning (USD/MWh)			Fuel (USD/MWh)	O&M (USD/MWh)	LCOE (USD/MWh)		
	Disc.Rate 3%	7%	10%	3%	7%	10%			3%	7%	10%
France	21,32	47,46	73,29	0,36	0,05	0,01	9,33	14,26	45,27	71,10	96,89
Japan	21,05	46,87	72,37	0,36	0,05	0,01	13,92	25,84	61,16	86,67	112,13
Korea	11,46	25,51	39,39	0,20	0,03	0,01	9,33	18,44	39,42	53,30	67,16
Russian Federation	12,06	26,86	41,47	0,21	0,03	0,01	4,99	10,15	27,41	42,02	56,61
Slovak Republic	36,76	81,84	126,37	1,80	0,96	0,64	9,33	9,72	57,61	101,84	146,06
United States	22,58	50,26	77,61	0,39	0,05	0,01	9,33	11,60	43,90	71,25	98,56
China	13,28	29,57	45,65	0,22	0,03	0,01	10,00	26,42	49,92	66,01	82,08
India	14,76	32,85	50,73	0,25	0,03	0,01	9,33	23,84	48,17	66,06	83,91



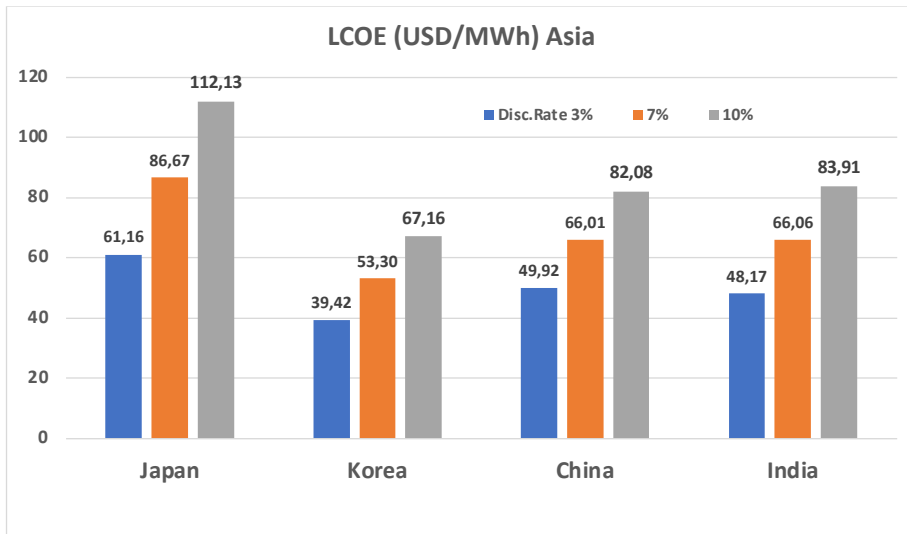
**Gambar 121** Nilai Diskon dan Biaya LCOE Beberapa Negara (USD/MWh) Teknologi PLTN, Pembangkit Baru

Evaluasi pembangkit listrik tenaga nuklir berdasarkan partisipasi 8 negara yang berasal dari negara OECD dan non-OECD. Negara-negara yang berkontribusi tercantum dalam **Tabel 9** beserta beberapa data terkait lainnya untuk dapat di analisis. Semua komponen untuk menganalisis nilai LCOE juga tercantum pada **Tabel 8**, dalam rangka mengevaluasi dan melihat beberapa komponen penting atau komponen dominan dalam menghasilkan nilai LCOE pembangkit. Komponen tersebut terdiri atas komponen Investasi, komponen O&M dan komponen bahan bakar serta komponen dekomisioning. Semua komponen dan total nilai LCOE menggunakan satuan USD/MWh untuk dilihat pada level satuan yang sama. Seperti dapat dilihat pada **Tabel 9** dan **Gambar 145**.



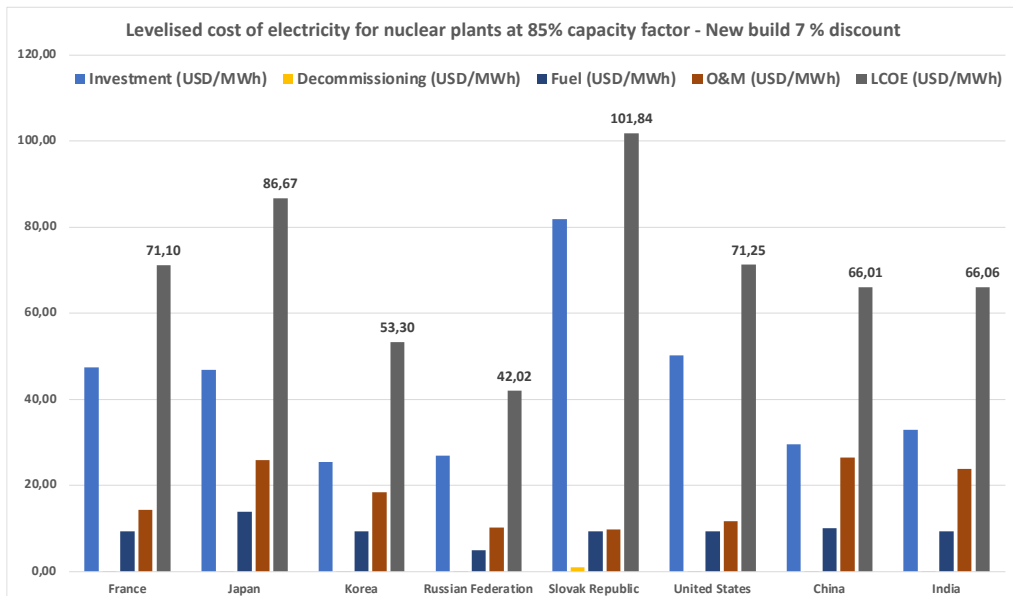
**Gambar 122** LCOE Eropa dan Amerika Serikat (USD/MWh) Teknologi PLTN, Pembangkit Baru





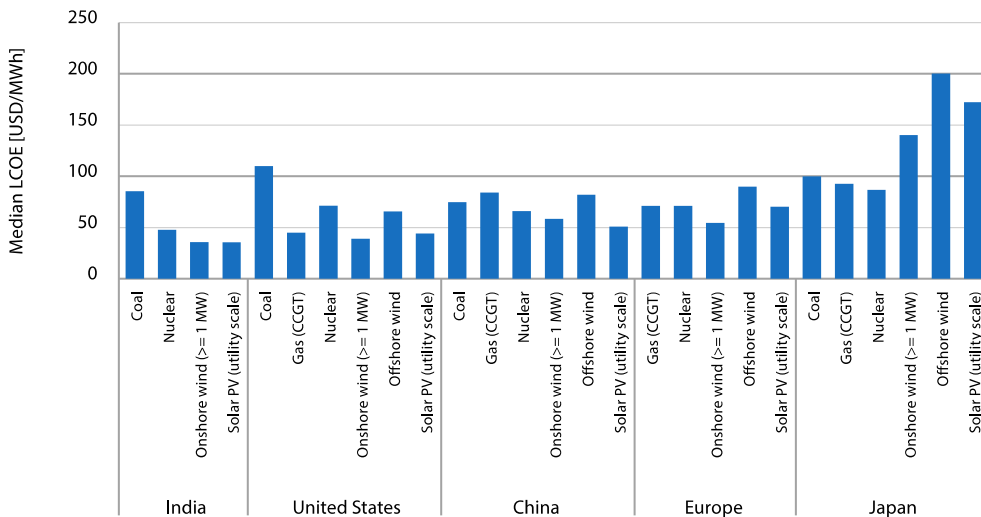
**Gambar 123** LCOE Negara-negara Asia (USD/MWh) Teknologi PLTN, Pembangkit Baru

Mengacu pada hasil evaluasi, nilai LCOE di negara-negara Eropa berkisar antara 42 USD/MWh sampai dengan 102 USD/MWh dengan menggunakan asumsi faktor kapasitas PLTN sekitar 85 % dan diskon 7 %, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 146**. Negara Rusia mempunyai nilai LCOE terendah. Dalam hal LCOE di USA, dapat dilihat sekitar 71 untuk tingkat diskonto 7%. Analisis serupa telah dilakukan untuk LCOE di negara-negara Asia yang menunjukkan bahwa LCOE di Asia sekitar 50 USD/MWh hingga 87 USD/MWh. Apabila nilai nilai diskon yang digunakan semakin kecil maka akan berdampak pada penurunan LCOE, dan jika semakin tinggi diskon maka akan memberikan nilai LCOE yang semakin tinggi seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 147**.



**Gambar 124** Biaya Komponen LCOE (USD/MWh) Teknologi PLTN, Pembangkit Baru

Negara Korea mempunyai nilai LCOE terendah di Asia, disusul India dan Cina, kemudian Jepang mempunyai nilai LCOE tertinggi. Untuk melihat komponen sensitif untuk estimasi LCOE dapat dilihat pada **Gambar 148** untuk masing-masing komponen untuk menghasilkan LCOE. Dapat diperkirakan bahwa komponen LCOE yang paling tinggi adalah komponen Investasi, diikuti oleh komponen O&M dan Bahan Bakar, dan penyumbang terkecil berasal dari bagian dekomisioning. Dari Gambar tersebut terlihat bahwa setiap negara memiliki biaya komponen yang khas. Secara keseluruhan LCOE dari negara-negara tersebut adalah sekitar 42 USD/MWh hingga 102 USD/MWh yang bergantung pada estimasi biaya negara. Berdasarkan wilayah, terlihat bahwa setiap wilayah memiliki nilai LCOE masing-masing untuk berbagai sumber energi. Pembangkit listrik tenaga nuklir memiliki biaya tertinggi di Jepang dibandingkan dengan sumber daya lainnya. Sementara di wilayah lain, LCOE PLTN kurang dari biaya bahan bakar fosil dan bersaing dengan sumber daya lainnya. India menunjukkan LCOE PLTN terendah dan biaya PLTN tertinggi oleh Jepang berdasarkan perbandingan negara-negara pada **Gambar 149** dan dibandingkan dengan variasi berbagai pembangkit lainnya. Nilai LCOE PLTN tersebut didasarkan pada kapasitas reaktor daya reaktor besar dengan laju daya 950 – 1700 MWe.



Note: Values at 7% cost of capital.

**Gambar 125** Perbandingan harga LCOE (USD/MWh) Tiap Pembangkit Listrik (IEA, 2020)

## 4.9 Evaluasi Biaya *Small Modular Reactor* (SMR)

Evaluasi biaya dan pengembangan teknologi SMR diperlukan basis data yang banyak dan standar, dengan variasi sebanyak mungkin sehingga hal ini sangat penting untuk setiap evaluasi dan diskusi yang senantiasa akan mengacu pada fakta tentang biaya masa depan nuklir khususnya SMR. *Energy Options Network* (EON) sebagaimana analisis sebelumnya menemukan bahwa setiap perusahaan memiliki pendekatannya masing-masing untuk perkiraan biaya pembangkit, membuat perbandingan “*apple-to-apple*” yang sebenarnya dengan reaktor air bertekanan (PWR) konvensional menjadi akan sulit dilakukan. Evaluasi EON ini dirancang untuk mengatasi kekurangan tersebut (Energy Options Network, 2018). Membandingkan biaya teknologi nuklir masa depan dengan desain saat ini (atau teknologi generasi lainnya) memerlukan pengumpulan data biaya untuk pembangkit nuklir canggih dengan cara yang standar dan komprehensif.

Dengan menggunakan kerangka akuntansi biaya pembangkit yang dikembangkan oleh Forum Internasional Generasi IV, EON membuat model biaya untuk evaluasi ini yang mencakup semua kategori biaya potensial untuk pembangkit nuklir *n<sup>th</sup>-of-a-kind* (NOAK). Ini termasuk nilai standar atau tetap untuk setiap kategori biaya (berdasarkan studi biaya sebelumnya yang dilakukan), dan memberikan kemampuan bagi perusahaan untuk

memasukkan model bisnis baru dan strateginya (Energy Options Network, 2018). Semua kontributor untuk evaluasi ini tercantum dalam **Tabel 10** untuk setiap basis teknologi yang berbeda.

**Tabel 10** Daftar peserta survei dari tipe reaktor dan kapasitas daya berbeda

Company	Reactor Type	Country	Reactor Capacity [MWe]	Plant Capacity [MWe]	Power reactor Type
Elysium Industries	MSR	USA	1000	1000	Large
General Electric	SFR	USA	1648	1648	Large
Moltex Energy	MSR	UK	1000	1000	Large
NuScale Power	APWR	USA	47,5	570	SMR-Multi
Terrestrial Energy	MSR	Canada	288	288	SMR-Single
ThroCon Power	MSR	USA	250	1000	SMR-Multi
Transatomic Power	MSR	USA	520	520	Medium
X-Energy	HTGR	USA	75	600	SMR-Multi

Note :

MSR : Molten Salt Reactor, SFR : Sodium Fast Reactor, APWR : Advanced Pressurized Water Reactor, HTGR : High Temperature Gas-Cooled Reactor

Large : Power reactor More and equal to 700 MWe

Medium : Power reactor Between and Equal 300 MWe up to 700 MWe

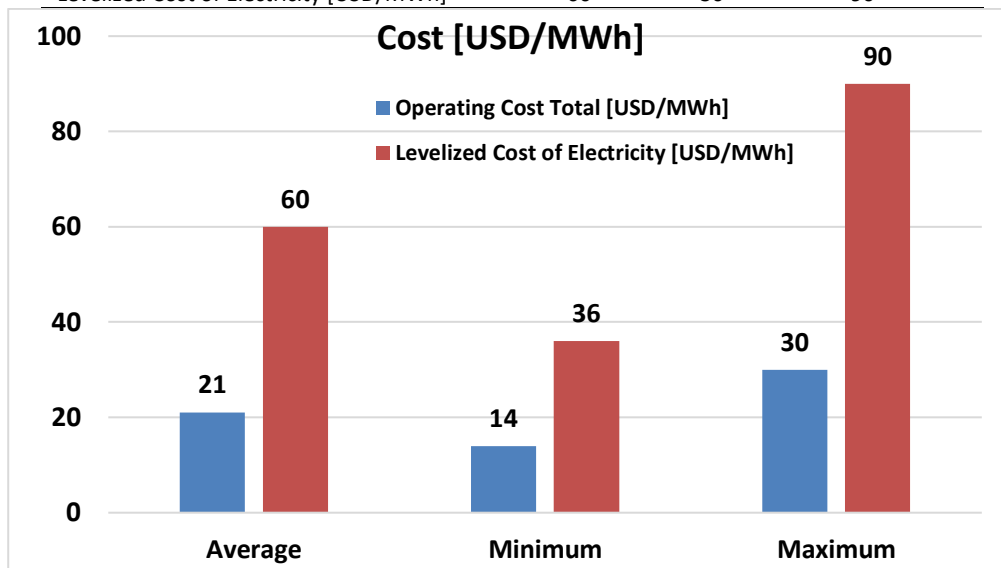
SMR : Small Modular Reactor

Single : Single unit NPP

Multi : Multi unit NPP

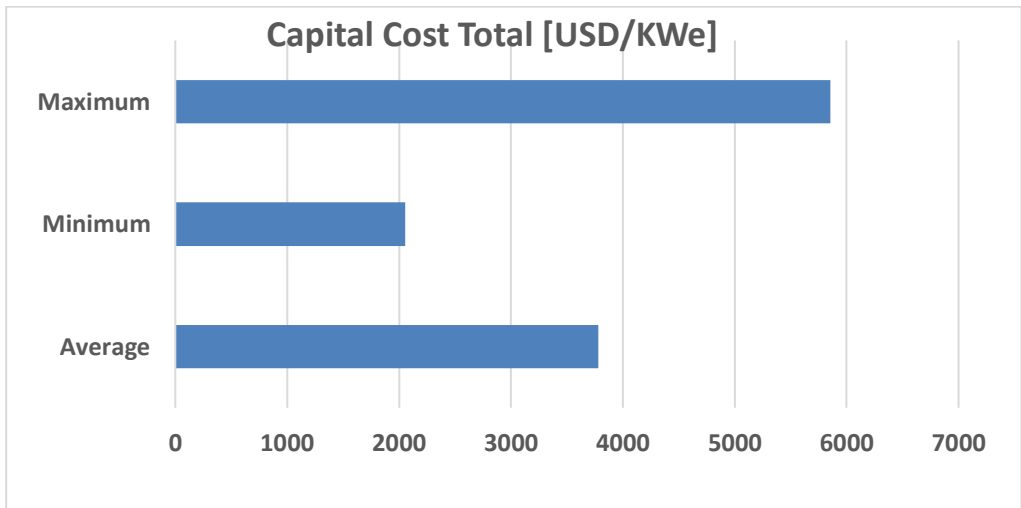
**Tabel 11** Ringkasan biaya dari semua perusahaan partisipan

Cost Componen (USD)	Average	Minimum	Maximum
Capital Cost Total [USD/KWe]	3782	2053	5855
Operating Cost Total [USD/MWh]	21	14	30
Levelized Cost of Electricity [USD/MWh]	60	36	90

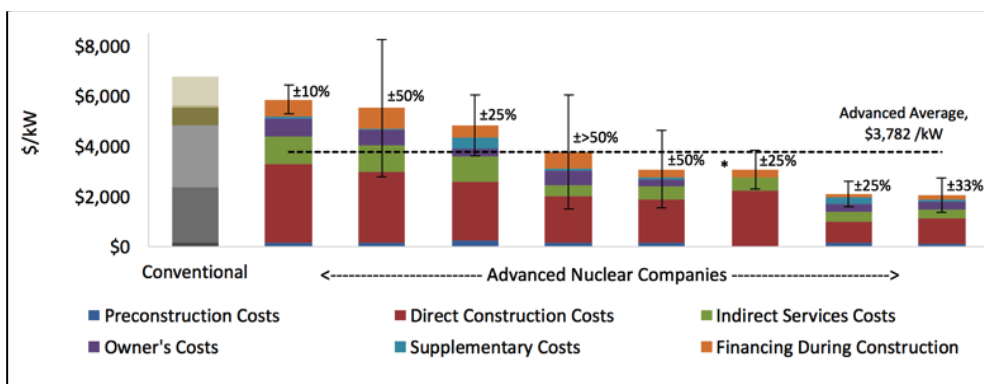


**Gambar 126** Ringkasan Rentang Biaya Operasional dan LCOE Semua Perusahaan Partisipan (USD/MWh)

Rata-rata biaya listrik yang diratakan (LCOE) sebesar \$60/MWh dari peserta evaluasi partisipan adalah 39 persen lebih rendah dari \$99/MWh yang diperkirakan oleh Badan Informasi Energi A.S. untuk pembangkit nuklir PWR yang mulai beroperasi pada awal tahun 2020-an. Dan kisaran biaya operasional dan biaya modal pembangkit serta LCOEnya ditunjukkan untuk rata-rata dan nilai minimum dan maksimum pada **Gambar 150** dan **Gambar 151** dan **Tabel 11**.



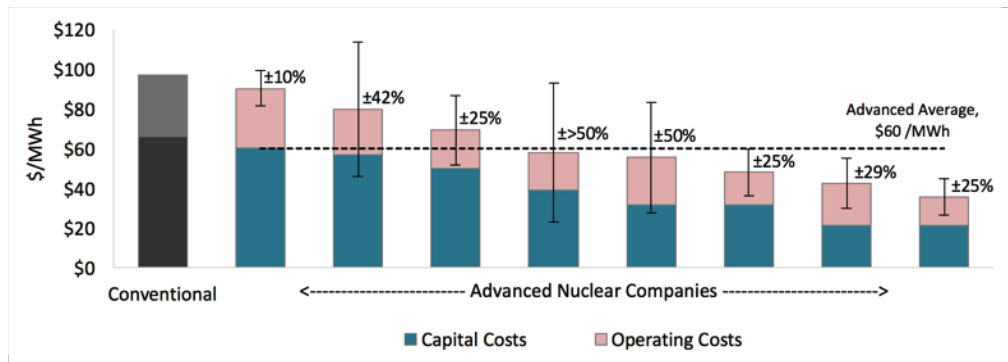
**Gambar 127** Biaya Kapital SMR (USD/KWe)



**Gambar 128** Rentang Biaya Modal SMR (USD/KWe) Semua Perusahaan Partisipan (Energy Options Network, 2018)

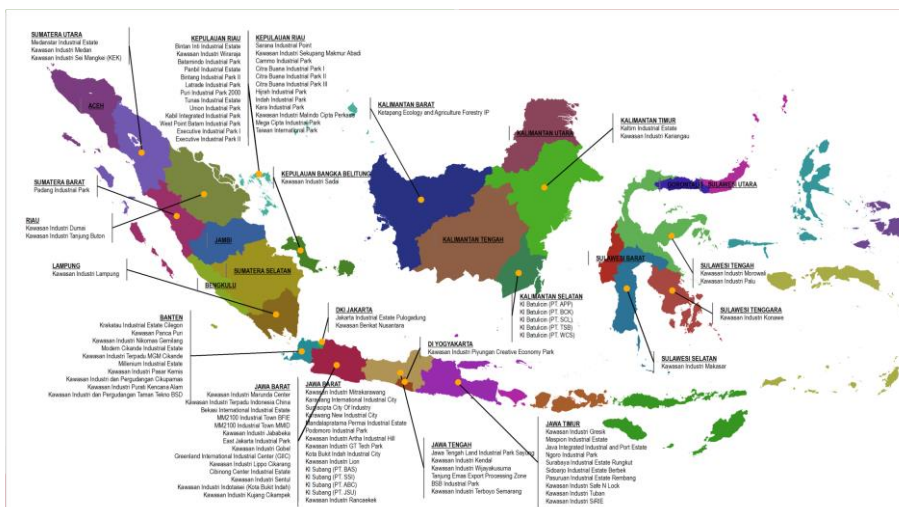
Perusahaan pembangkit nuklir sedang merancang pembangkit yang biayanya sangat kompetitif di pasar energi. Perusahaan memiliki perkiraan biaya yang lebih lengkap daripada yang diantisipasi, dan mampu

menunjukkan dasar perhitungan yang kredibel untuk perkiraan biaya mereka seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 152** untuk biaya modal (Energy Options Network, 2018). LCOE untuk tipe SMR diperkirakan memiliki nilai rata-rata 60 USD/MWh dan nilai maksimum LCOE sekitar 90 USD/MWh seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 153** untuk LCOE.



Note: Levelized cost of electricity (LCOE) assumptions include capitalization period of 25 years, discount rate of 7 percent, and capacity factor of 95 percent (IEA, 2020).

**Gambar 129** Rentang biaya kapital, operasional, dan total LCOE SMR (USD/ MWh) semua perusahaan partisipan (Energy Options Network, 2018)

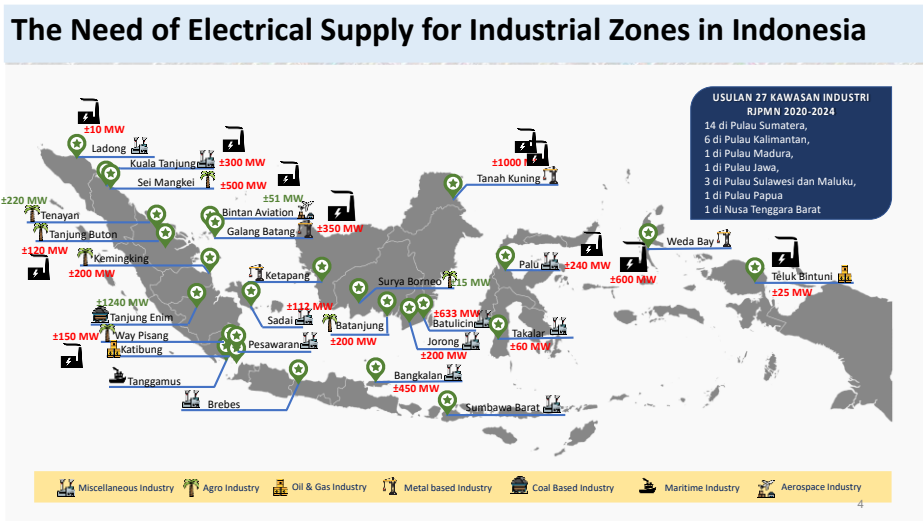


**Gambar 130** Daerah Distribusi Zona Industri di Indonesia (Kemenperin, 2020).

### 4.10 PLTN SMR untuk Zona Industri dan Ekonomi Khusus

Sebagai negara berkembang, Indonesia harus menggerakkan perekonomiannya dengan menjalankan banyak kegiatan industri tidak hanya

terpusat di pulau Jawa, tetapi juga di luar Pulau Jawa terutama di daerah berpenduduk sedikit dengan sumber daya alam yang melimpah seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 154 dan Gambar 155**. Kawasan kawasan industri masih didominasi oleh wilayah Jawa dengan total sekitar 72 % dibandingkan dengan zona lain pada tahun 2014 seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 12**.



**Gambar 131** Daerah Distribusi Zona Industri di Indonesia dan Kebutuhan Listrik. (Kemenperin, 2020)\*  
 \*Note : Data kebutuhan listrik dan operasional dicantumkan mengacu pada data kemenperin

Kawasan industri tersebut membutuhkan listrik dalam jumlah yang signifikan dibandingkan dengan kebutuhan perumahan dan akan meningkatkan permintaan ketika zona tersebut meningkat. Jumlah kawasan industri meningkat secara total dari 74 kawasan di tahun 2014 menjadi 103 kawasan di tahun 2019 di mana hampir 30 kawasan industri baru dibangun. Dalam hal persentase pangsa untuk wilayah Jawa lebih sedikit pada tahun 2019 meskipun jumlahnya masih meningkat dibandingkan tahun 2015. Zona-zona lainnya meningkat baik persentase maupun jumlahnya pada tahun 2019 dan peningkatan jumlah yang signifikan dicapai oleh zona Sumatra seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 12 dan Tabel 13** (Kemenperin, 2020).

**Tabel 12** Pengembangan Zona Industri di Indonesia dan Distribusinya 2014 (Kemenperin, 2020)

Number of Industrial Zone 2014				
No	Zone	Number	Industrial Zone Size [Ha]	Size Percentage [%]
1	Java	50	26127,4	71,99
2	Sumatera	19	7019,1	19,34
3	Sulawesi	2	2203	6,07
4	Kalimantan	3	946	2,61
<b>Total</b>		<b>74</b>	<b>36295,5</b>	<b>100</b>

**Tabel 13** Pengembangan Zona Industri di Indonesia dan Distribusinya 2019 (Kemenperin, 2020)

Number of Industrial Zone 2019				
No	Zone	Number	Industrial Zone Size [Ha]	Size Percentage [%]
1	Java	58	35376,89	64
2	Sumatera	33	11962,4	22
3	Sulawesi	4	5500	10
4	Kalimantan	8	2342,13	4
<b>Total</b>		<b>103</b>	<b>55181,42</b>	<b>100</b>

Seperti yang disajikan pada **Tabel 14** Daftar Kebutuhan Infrastruktur Ketenagalistrikan untuk Kawasan Industri di Indonesia berdasarkan program RPJMN yang menunjukkan bahwa setiap kawasan industri memiliki kebutuhan listriknya masing-masing. Berdasarkan 26 kawasan industri, memiliki rentang kebutuhan listrik 10 MWe hingga kisaran daya 1000 MWe. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 162, berdasarkan peta sebaran zona industri dan meletakkan data dari **Tabel 14** untuk masing-masing zona kebutuhan listriknya, dapat dilihat peta kebutuhan listrik untuk zona industri di Indonesia.

**Tabel 14** Daftar Kebutuhan Infrastruktur Listrik Untuk Zona Industri di Indonesia (Kemenperin, 2020)

Electricity Infrastructure Demand					Estimated NPP Use
No	Industrial Zone (IZ)	Existing electricity Supply	Electric Demand	Program	Power and Type
1	IZ Teluk Weda		±600 MW	RPJMN	Medium/SMR 300-700 MWe
2	IZ Ketapang		electric supply from PLN 87 MW	PRPJMN-PSN	SMR 50-100 MWe
3	IZ Galang Batang	In Construction 6x25 MW, 8x150 MW and 10x150 MW	350 MW	RPJMN	SMR/Medium 300-700 MWe
4	IZ Suryo Borneo	Power Plant Turbine 2 x 7.5 MW		RPJMN	VSMR 1-10 MWe
5	IZ Sadai	Electricity Need 112 MW Biomass supply for 65 MVA	112 MW	RPJMN	SMR 100-300 MWe



Electricity Infrastructure Demand					Estimated NPP Use
No	Industrial Zone (IZ)	Existing electricity Supply	Electric Demand	Program	Power and Type
6	IZ Tanjung Enim	Coal PP Sumsel 8 for 2x620 MW		RPJMN	Medium/Large 600-1200 MWe
7	IZ Batulicin	PLN 50 MW, Coal PP 3,5 MW and 6 MW, And plan for 2x100 MW	633 MW	PRPJMN-PSN	Medium/SMR multi 300-700
8	Bintan Aerospace	Power Plant 21 MW + 2 x 15 MW coal fired Under Construction, and 10.3 MW diesel PP		RPJMN	SMR 10-50 MWe
9	IZ Jorong	Coal PP Asam-Asam 2 x 100 MW and increase to 4 x 100 MW. Total electricity need is 200 MW	200 MW	PRPJMN-PSN	SMR 100-300 MWe
10	IZ Tanah Kuning		1000 MW (Potential hydro electri Kayan River)	PRPJMN-PSN	Large 1000-1500 MWe
11	IZ Kuala Tanjung		300 MW (potential Gas/wind PP), 5 MW liquid industry	PRPJMN-PSN	SMR 300 MWe
12	KEK Sei Mangkei	Gas PP 250 MW	500 MW up to 2025	PRPJMN-PSN	SMR/Medium 200-500 MWe
13	IZ Kemingking	2x200MW, MoU PLN 35 MW	2 x 100 MW	RPJMN	SMR 100-200 MWe
14	IZ Teluk Bintuni	Grid with capacity 2000 KW	25 MW	PRPJMN-PSN	SMR 10-50 MWe
15	KEK Palu		240 MW	PRPJMN-PSN	SMR 100-300 MWe
16	IZ Bangkalan (KKJSM)		450 MW	RPJMN	Medium/SMR muti 300-500 MWe
17	IZ Tanggamus	150 kV		PRPJMN-PSN	
18	IZ Tenayan	Coal PP 2x100 MW, underconstruction 27 MW Steam and Gas PP		RPJMN	SMR 10-50 WWe
19	IZ Brebes	Under construction grid and transmission 500 kV and 150 kV		RPJMN	
20	IZ Tanjung Buton		120 MW	PRPJMN-PSN	SMR 100-200 MWe
21	IZ way Pisang		150 MW	RPJMN	SMR 100-200 MWe
22	IZ Katibung			RPJMN	
23	IZ Pesawaran			RPJMN	
24	IZ Ladong		10 MW	RPJMN	VSMR/SMR 5-10 MWe
25	IZ Batanjung		200 MW	RPJMN	SMR 100-300 MWe
26	IZ Takalar		60 MW	RPJMN	SMR 50-100 MWe

Note : Data from reference (Kemenperin, 2020) and estimated NPP power utilization and reactor type

**Tabel 15** Daftar Kebutuhan Infrastruktur Listrik Untuk Zona Industri di Indonesia PrograM Non RPJMN (Kemenperin, 2020)

Electricity Infrastructure Demand (non RPJMN)			
No	Industrial Zone (IZ)	Existing electricity Supply	Electric Demand
1	IZ Dumai		±600 MW

Electricity Infrastructure Demand (non RPJMN)			
No	Industrial Zone (IZ)	Existing electricity Supply	Electric Demand
2	IZ Konawe	40 MW and 80 MW, in planning 500 MW PLN	2,4 GW for VDNI and OSS
3	IZ Bantaeng	-	200-200 MW
4	KEK Bitung	-	100 MW
5	IZ Wilmar Serang	PLN 20 MW	500 MW for next 10 years
6	IZ JIPE	-	15 MW
7	IZ Kendal	-	100 MW
8	KEK Arun Lhokseumawe	-	350 MW
9	IZ Tanjung Api Api	Grid 60 MW	753,87 MW
10	IZ MBTK	PLN 1 MW	144 MW
11	IZ Sorong	-	344,8 MW
12	IZ Landak	-	-
13	IZ Morowali	coal PP 1830 MW	-
14	Buli	-	-

Note : Data from reference (Kemenperin, 2020)

Font merah sesuai dengan kebutuhan listrik dan font hijau sesuai dengan kapasitas daya listrik yang ada di zona tersebut seperti yang ditunjukkan pada Gambar 163. Selain itu, kebutuhan listrik untuk zona industri lainnya untuk program non RPJMN tercantum pada **Tabel 15**. Dari daftar zona tersebut membutuhkan kebutuhan listrik dari 15 MWe sampai dengan 2,4 GWe tergantung pada daerahnya. Estimasi pemanfaatan PLTN juga ditabulasikan pada **Tabel 16** untuk menunjukkan skala daya dan tipe reaktor. Penggunaan PLTN untuk kawasan industri akan tergantung pada skala atau kebutuhan listrik yang berkisar antara 15 sampai 2,4 GWe. Estimasi kebutuhan listrik PLTN tersebut ditunjukkan pada Tabel 14 dan 15 dan ringkasan pemanfaatan skala daya PLTN dan jenis reaktornya ditabulasikan pada **Tabel 16**.

**Tabel 16** Daftar rentang dan tipe reaktor daya zona industri

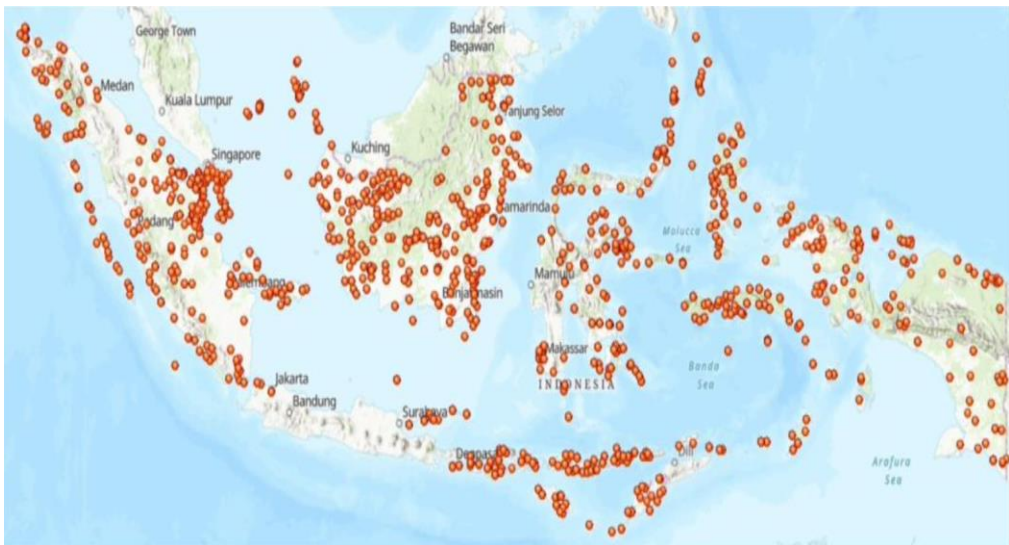
No	NPP Type	Power Range
1	SMR-Single	50-100 MW
2	VSMR-single	< 10 MW
3	SMR single	10-50 MW
4	SMR Multi/Medium NPP-Single	300-700 MW
5	SMR-Single	100-300 MW
6	Large Reactor/Medium multi	700-1500 MW

#### 4.11 PLTN SMR dan Reaktor Mikro untuk Program De-dieselisasi

Skalabilitas daya yang dihasilkan pembangkit selain tipe PLTN SMR ada juga untuk skala Mikro Reaktor yang bertujuan untuk mensuplai daya beban yang

kecil dan mikro dalam skala PLTN. Seperti disebutkan sebelumnya skala SMR dibawah 300 Mwe dan untuk reaktor mikro orde beberapa Mwe. Sebagai salah satu program NZE dan mengurangi kebergantungan pada bahan bakar fosil berupa minyak sebagai bahan bakar, perusahaan listrik negara (PLN), mempunyai program nasional, yaitu program de-dieselisasi. Program ini memiliki beberapa tahapan (PLN, 2022b):

1. Interkoneksi sistem terisolasi ke jaringan akan membuat pembangkit listrik tenaga diesel pada sistem tersebut mati, tidak beroperasi lagi.
2. Memperkenalkan gasifikasi dan membangun pembangkit listrik tenaga gas (non BBM).
3. Program konversi PLTD menjadi energi baru dan terbarukan dan menggunakan skema hibrid dengan baterai dalam sistem terisolasi yang sulit membangun transmisi untuk interkoneksi ke jaringan listrik.

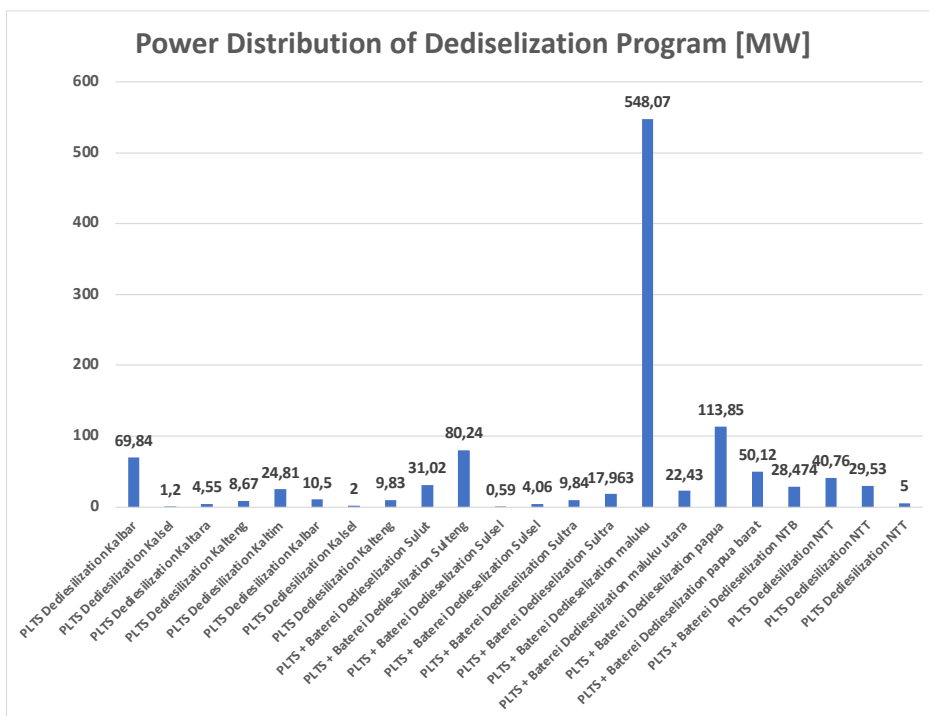


**Gambar 132** Distribusi 5200 unit PLTD di sekitar 2130 lokasi di Indonesia (PLN, 2021)

Sekitar 5200 unit pembangkit listrik tenaga diesel dalam kapasitas listrik yang ada di Indonesia, di mana area tersebut tersebar di sekitar 2130 lokasi seperti tampak dalam **Gambar 156**. Di lokasi tersebut juga berpotensi untuk diadopsi program konversi sebagai program de-dieselisasi menjadi pembangkit listrik energi baru dan terbarukan (EBT) di mana program tersebut dapat dijalankan dengan beberapa tahapan tergantung pada evaluasi dan potensi ketersediaan serta permintaan di daerah tersebut. Sistem untuk tahap pertama, program konversi de-dieselisasi untuk 200 lokasi yang setara

dengan sekitar 225 MW. Untuk PLTD yang telah beroperasi lebih dari 15 tahun dan berada di daerah terisolir serta mengkonsumsi BBM lebih dari 0,2738 liter/kWh akan diganti dengan pembangkit baru dari EBT. Sasaran lainnya adalah di banyak lokasi program konversi pembangkit listrik tidak beroperasi secara kontinyu dalam 24 jam (PLN, 2021).

Seperti terlihat pada Gambar 158, sebaran program de-dieselisasi sangat tersebar di seluruh pulau di Indonesia dan daerah tersebut memiliki kebutuhan listrik tergantung wilayah yang ditunjukkan pada **Gambar 157** untuk kebutuhan listrik berkisar antara 0,6 MWe sampai dengan 550 MWe permintaan listrik. Maluku memiliki permintaan listrik tertinggi untuk program ini dan diikuti oleh papua, sulteng dan Kalbar sebagai daerah permintaan listrik yang besar. Untuk potensi pemanfaatan PLTN untuk program de-dieselisasi tercantum pada **Tabel 17** untuk estimasi skala daya dan tipe reaktor yang disesuaikan dengan kebutuhan listrik masing-masing provinsi atau zona.



**Gambar 133** Distribusi Daya Program De-dieselisasi di tiap provinsi di Indonesia. Note : Data (PLN, 2021)

**Tabel 17** Daftar kebutuhan infrastruktur listrik untuk daerah de-dieselisasi di Indonesia

No	Project Name	Power [MW]	COD*	Note	NPP Type	Power Range**
1	PLTS De-dieselization Kalbar	69,84	2023	De-dieselization Isolated system	SMR single	50-100 MW
2	PLTS De-dieselization Kalsel	1,2	2023	De-dieselization Isolated system	VSMR-Single	< 10 MW
3	PLTS De-dieselization Kaltara	4,55	2023	De-dieselization Isolated system	VSMR-Single	< 10 MW
4	PLTS De-dieselization Kalteng	8,67	2023	De-dieselization Isolated system	VSMR-Single	< 10 MW
5	PLTS De-dieselization Kaltim	24,81	2023	De-dieselization Isolated system	SMR single	10-50 MW
6	PLTS De-dieselization Kalbar	10,5	2025	De-dieselization Isolated system	SMR single	10-50 MW
7	PLTS De-dieselization Kalsel	2	2025	De-dieselization Isolated system	VSMR-Single	< 10 MW
8	PLTS De-dieselization Kalteng	9,83	2025	De-dieselization Isolated system	VSMR-Single	< 10 MW
9	PLTS + Baterei De-dieselization Sulut	31,02	2023	De-dieselization program NRE	MSR single	10-50 MW
10	PLTS + Baterei De-dieselization Sulteng	80,24	2023	De-dieselization program NRE	MSR single	50-100 MW
11	PLTS + Baterei De-dieselization Sulsel	0,59	2023	De-dieselization program NRE	VSMR-Single	< 10 MW
12	PLTS + Baterei De-dieselization Sulsel	4,06	2025	De-dieselization program NRE	VSMR-Single	< 10 MW
13	PLTS + Baterei De-dieselization Sultra	9,84	2023	De-dieselization program NRE	VSMR-Single	< 10 MW
14	PLTS + Baterei De-dieselization Sultra	17,963	2025	De-dieselization program NRE	SMR single	10-50 MW
15	PLTS + Baterei De-dieselization Maluku	548,07	2023	De-dieselization program NRE	SMR Multi/Medium NPP-Single	300-700 MW
16	PLTS + Baterei De-dieselization Maluku utara	22,43	2023	De-dieselization program NRE	SMR single	10-50 MW
17	PLTS + Baterei De-dieselization Papua	113,85	2023/2025	De-dieselization program NRE	SMR-Single	100-300 MW
18	PLTS + Baterei De-dieselization Papua barat	50,12	2023/2025	De-dieselization program NRE	SMR single	50-100 MW
19	PLTS + Baterei De-dieselization NTB	28,474	2023	De-dieselization Isolated system	SMR single	10-50 MW
20	PLTS De-dieselization NTT	40,76	2023	De-dieselization Isolated system	SMR single	10-50 MW
21	PLTS De-dieselization NTT	29,53	2023	De-dieselization Isolated system	SMR single	10-50 MW
22	PLTS De-dieselization NTT	5	2025	De-dieselization Isolated system	VSMR-Single	< 10 MW

Note : Data from reference (PLN, 2021) and estimated NPP power utilization and reactor type,

\*COD program saat ini untuk de-dieselization

\*\*Potensial pemanfaatan PLTN untuk program selanjutnya atau untuk alternatif pembangkit

**Tabel 18** Daftar rentang dan tipe reaktor daya program de-dieselisasi

No	NPP Type	Power Range
1	SMR-Single	50-100 MW

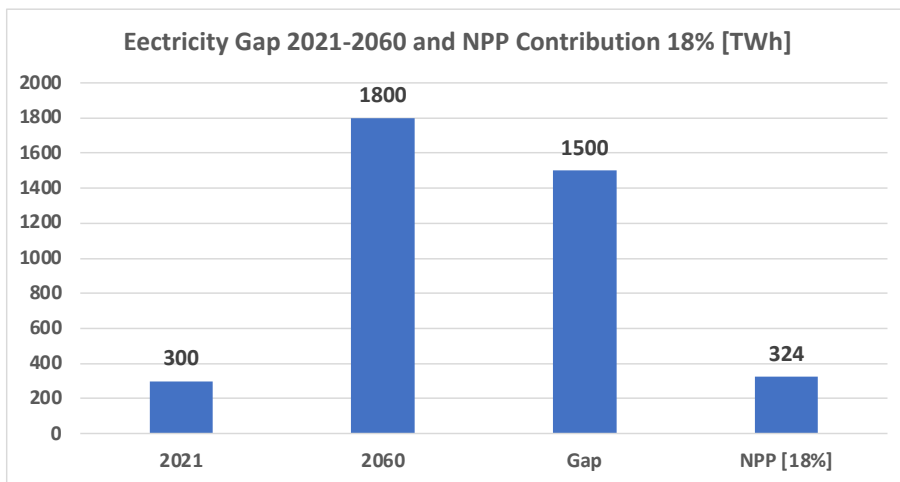
2	VSMR-single	< 10 MW
3	SMR single	10-50 MW
4	SMR Multi/Medium NPP-Single	300-700 MW
5	SMR-Single	100-300 MW
6	SMR single	10-50 MW

Potensi pemanfaatan PLTN untuk program de-dieselisasi akan tergantung pada skala atau kebutuhan listrik yang berkisar antara 0,6 MWe sampai dengan 550 MWe kebutuhan listrik. Estimasi kebutuhan listrik PLTN tersebut ditunjukkan pada **Tabel 16** dan ringkasan pemanfaatan skala daya PLTN dan jenis reaktornya ditabulasikan pada **Tabel 18**. SMR yang digunakan bisa dalam unit untuk atau multi-unit disesuaikan dengan kebutuhan daerah yang dituju dan juga dapat dikombinasikan untuk kebutuahan lainnya seperti program ko-generasi pembangkit. Sinergi dengan pembangkit listrik lainnya dalam sistem hibrid juga dimungkinkan terjadi.

## 5. IMPLEMENTASI ENERGI NUKLIR PADA PROGRAM NZE

### 5.1 Peta Kebutuhan Listrik dari PLTN pada Program NZE

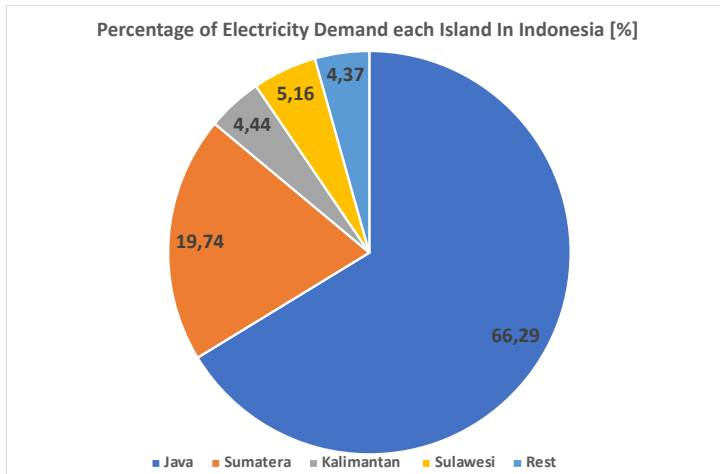
Seperti telah disinggung pada bagian sebelumnya bahwa program *net zero emission* (NZE) oleh pemerintah yang mensyaratkan kebutuhan listrik pada tahun 2060 sebesar 1885 Terawatt Hours (TWh) (1728 TWh PLN dan 157 TWh dari non-PLN). Jika kita bandingkan dengan kebutuhan listrik eksisting pada tahun 2021 sekitar 300 TWh, akan ada gap atau tambahan kebutuhan listrik untuk memenuhi kebutuhan energi penuh pada tahun 2060 sekitar 1800 TWh. Sehingga ada gap kebutuhan di tahun 2060 dibandingkan dengan tahun 2021 sekitar 1500 TWh yang diperlukan untuk dibangun pembangkit listrik baru.



**Gambar 134** Gap Suplai Listrik Program NZE 2060 dibandingkan 2021 dan Kontribusi PLTN  
Note : Data from reference (Setiawan, 2021) and combined with reference (National Energy Council, 2021)

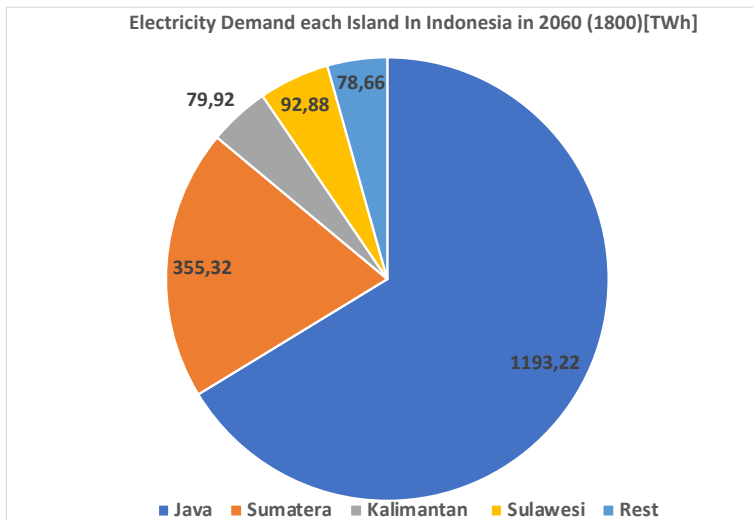
Permintaan yang meningkat ini harus dipasok oleh energi baru dan terbarukan (EBT) sebagai target program NZE. PLTN merupakan salah satu sumber EBT yang akan berkontribusi pada program NZE pada tahun 2060 atau sekitar 18% dari total 1800 TWh. PLTN dengan kontribusi 18 % dapat diperkirakan sama dengan kontribusi sebesar 324 TWh pada tahun 2060 seperti terlihat pada **Gambar 158**. Analisis ini bermaksud untuk membuat peta kontribusi pemanfaatan PLTN menurut luas pulau utama di Indonesia. Permintaan listrik setiap provinsi akan tergantung pada provinsi dan

perkiraan data dapat digunakan yang menunjukkan Pulau Jawa membutuhkan listrik sekitar 66% dari total listrik Di Indonesia, diikuti oleh Sumatera dengan hampir 20% dan sisanya pulau dengan 4-5% kebutuhan listrik seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 159**.



Note : Referensi data (National Energy Council, 2021)

**Gambar 135** Persentase kebutuhan listrik tiap provinsi di Indonesia

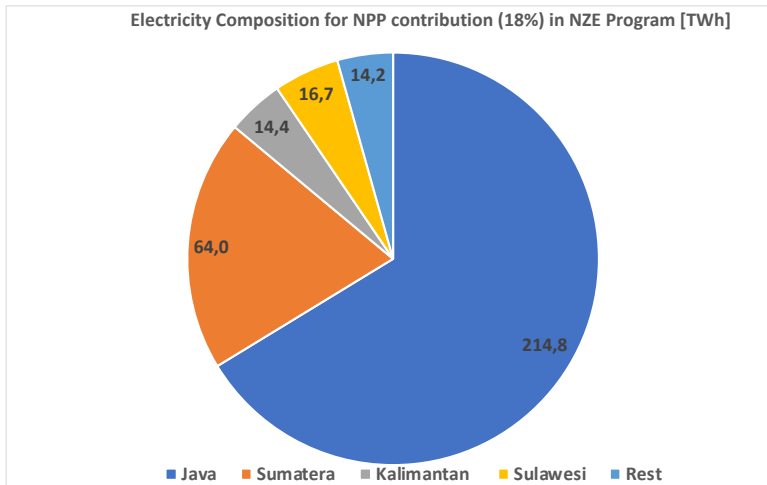


**Gambar 136** Komposisi kebutuhan listrik tiap provinsi tahun 2060 untuk total 1800 TWh

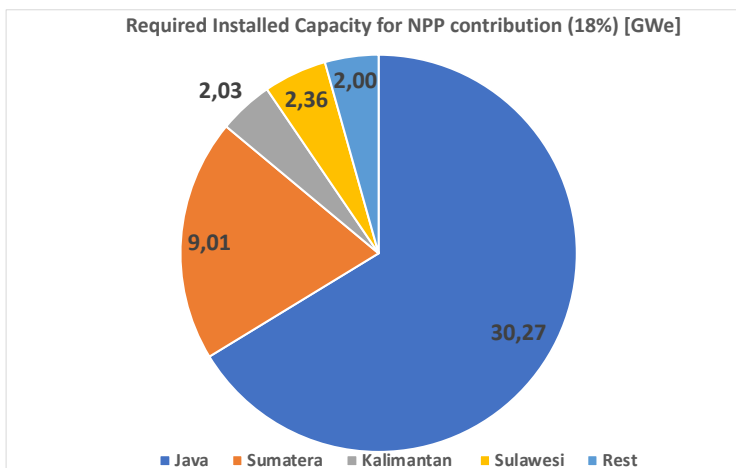
Berdasarkan persentase permintaan setiap pulau, dapat digunakan untuk memperkirakan kebutuhan listrik riil dalam TWh untuk setiap pulau yang ditunjukkan pada **Gambar 160**. Pulau Jawa membutuhkan listrik 1200 TWh,



sedangkan Pulau Sumatera membutuhkan listrik 355 TWh listrik dan pulau lainnya membutuhkan 79-93 TWh listrik pada tahun 2060. Seperti disebutkan bahwa energi nuklir berkontribusi sebesar 18 % yang setara dengan 324 TWh pada tahun 2060 sebagai bagian dari program NZE. Dari total 324 TWh tersebut akan dibagi kontribusi listrik ke masing-masing pulau berdasarkan kebutuhan listrik seperti pada **Gambar 161**. Komposisi pembagian kontribusi daya PLTN ke setiap pulau diasumsikan sama dengan komposisi kebutuhan listrik secara total.



**Gambar 137** Komposisi kontribusi Listrik PLTN (18%) pada Program NZE 2060

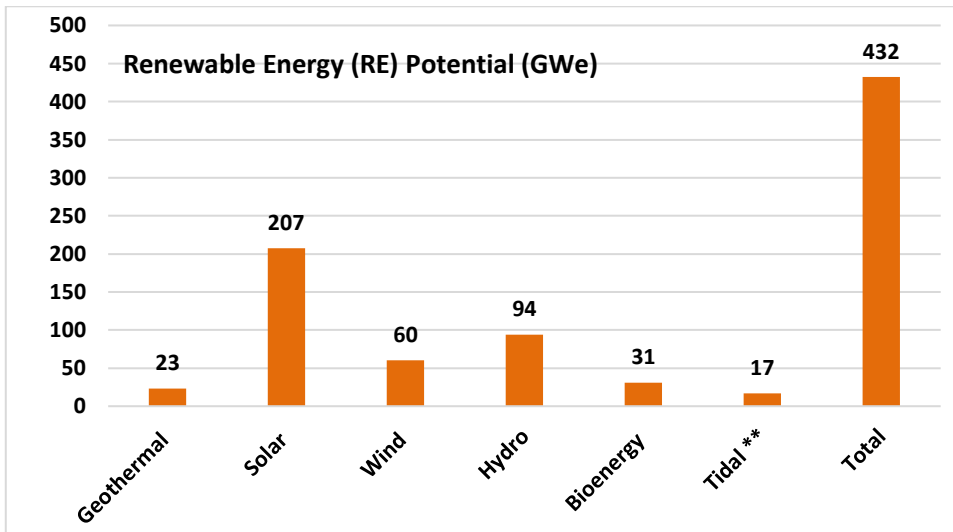


**Gambar 138** Kebutuhan kapasitas terpasang untuk kontribusi PLTN (18%) pada Program NZE [GWe]

Estimasi porsi listrik dari PLTN setiap pulau ditunjukkan pada **Gambar 162** yang menunjukkan Pulau Jawa akan memiliki sekitar 214 TWh listrik dari energi nuklir, sedangkan Pulau Sumatra akan menggunakan 64 energi Nuklir dan pulau lainnya Kalimantan, Sulawesi, dan sisanya akan menggunakan 14,4 TWh, 16,7 TWh dan 14,2 TWh. Jika kebutuhan listrik dalam TWh diubah menjadi kapasitas daya pembangkit listrik, dibutuhkan faktor kapasitas masing-masing pembangkit listrik dan dikurangi kerugian transmisi atau utilisasi. Dalam kasus PLTN, dapat digunakan faktor kapasitas 90% dengan kehilangan transmisi dan pemanfaatan lainnya sebesar 10%. Untuk 324 TWh PLTN akan sama dengan sekitar 46 GWe kapasitas listrik PLTN. Estimasi kapasitas terpasang tiap pulau ditunjukkan pada **Gambar 162**. Pulau Jawa membutuhkan kapasitas terpasang PLTN sekitar 30,3 GWe, sedangkan pulau sumatra membutuhkan 9 GWe dan pulau lainnya membutuhkan kapasitas terpasang 2-2,4 GWe.

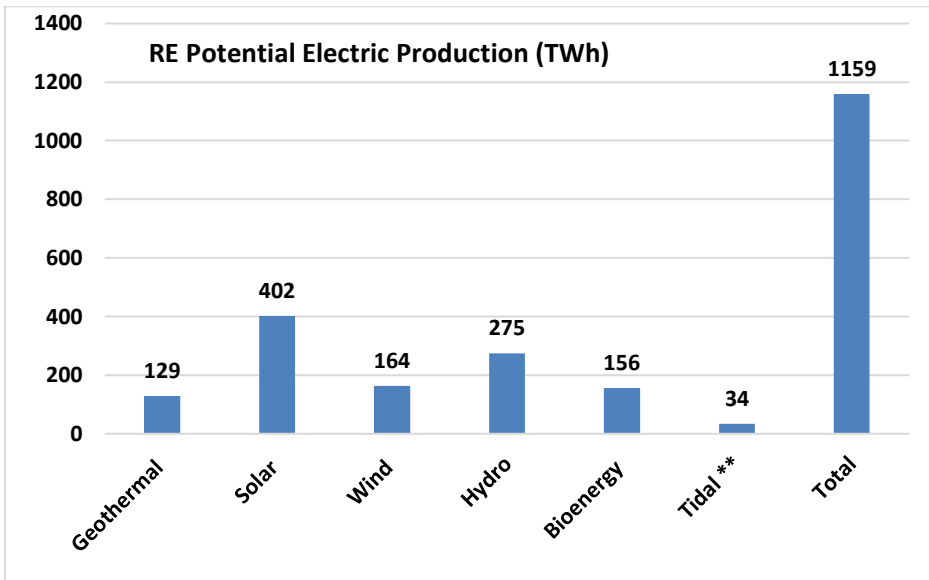
## 5.2 Gap Kebutuhan Listrik 2060 NZE

Program Net Zero Emission (NZE) membutuhkan kebutuhan listrik sekitar 1885 TWh pada tahun 2060 dan memiliki gap atau tambahan kebutuhan energi sekitar 1500 TWh pada tahun 2060 untuk memenuhi kebutuhan sekitar 1800 TWh dibandingkan dengan kebutuhan listrik yang ada pada tahun 2021 sekitar 300 TWh. Pada bagian ini akan dibahas gap analysis berdasarkan kemampuan pasokan energi terbarukan (RE) untuk program NZE tahun 2060. Seperti terlihat pada **Gambar 163** Total potensi energi terbarukan di Indonesia diperkirakan sebesar 432 GWe berdasarkan kontribusinya masing-masing sumber energi seperti panas bumi 23 GWe, energi Surya 207 GWe, energi angin 60 GWe, energi Hidro 94 GWe, Bioenergi 31 GWe, dan Energi Pasang Surut 17 GWe.

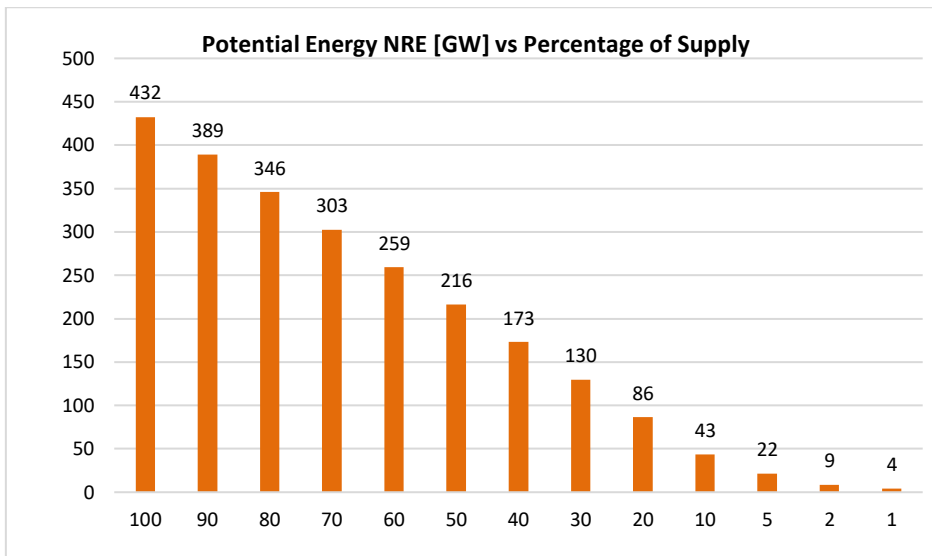


**Gambar 139** Potensi Energi Terbarukan di Indonesia [GWe]

Potensi tersebut masih merupakan perkiraan yang dapat divalidasi dengan mengeksplorasi kondisi aktual dan pendekatan ketergantungan situs dan teknologi yang tepat. Dari kapasitas daya energi perlu dikonversi menjadi produksi listrik yang didasarkan pada kemampuan masing-masing pembangkit untuk menghasilkan listrik setiap tahunnya. Produksi listrik dari masing-masing energi terbarukan dan estimasi total produksi dari energi kapasitas potensial ditunjukkan pada **Gambar 164**. Produksi listrik seperti yang ditunjukkan diperkirakan dari kapasitas energi potensial dan diubah menjadi produksi listrik dengan menggunakan faktor Kapasitas dari masing-masing sumber energi yang menunjukkan Faktor Kapasitas dari Berbagai Sumber Energi.



**Gambar 140** Potensi produksi listrik energi terbarukan di Indonesia [TWh]

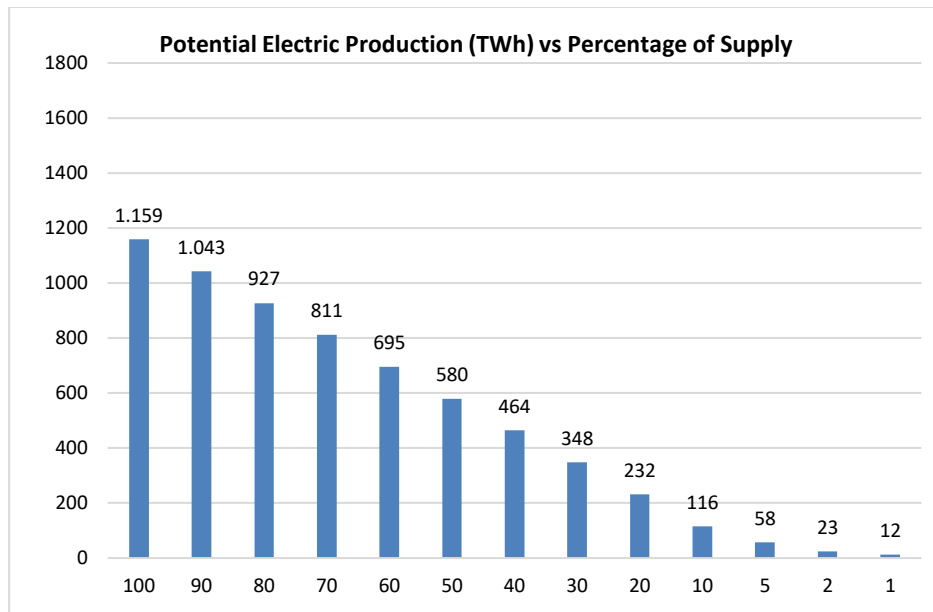


Percentage of Supply [%]

**Gambar 141** Persentase pemanfaatan potensi energi terbarukan di Indonesia [GWe]

Estimasi total produksi listrik berdasarkan total potensi energi terbarukan yang dimanfaatkan penuh dari masing-masing sumber energi adalah sebesar 1159 TWh. Total produksi listrik ini berasal dari kontribusi listrik dari panas bumi 129 TWh, energi surya 402 TWh, energi angin 164 TWh, energi hidro 275

TWh, bioenergi 156 TWh dan energi pasang surut diperkirakan setara 34 TWh. Potensi sumber daya energi ini dapat diperkirakan dari kemungkinan pemanfaatan dari pemanfaatan rendah 1% sampai dengan pemanfaatan 100% bila semua potensi dapat dibuktikan dapat dimanfaatkan seluruh potensi untuk dihasilkan listrik. Kisaran kemungkinan pemanfaatan potensi energi terbarukan ditunjukkan pada **Gambar 165** yang memperkirakan persentase pemanfaatan potensi energi terbarukan di Indonesia dalam GWe dari kisaran 1% sampai dengan 100%.



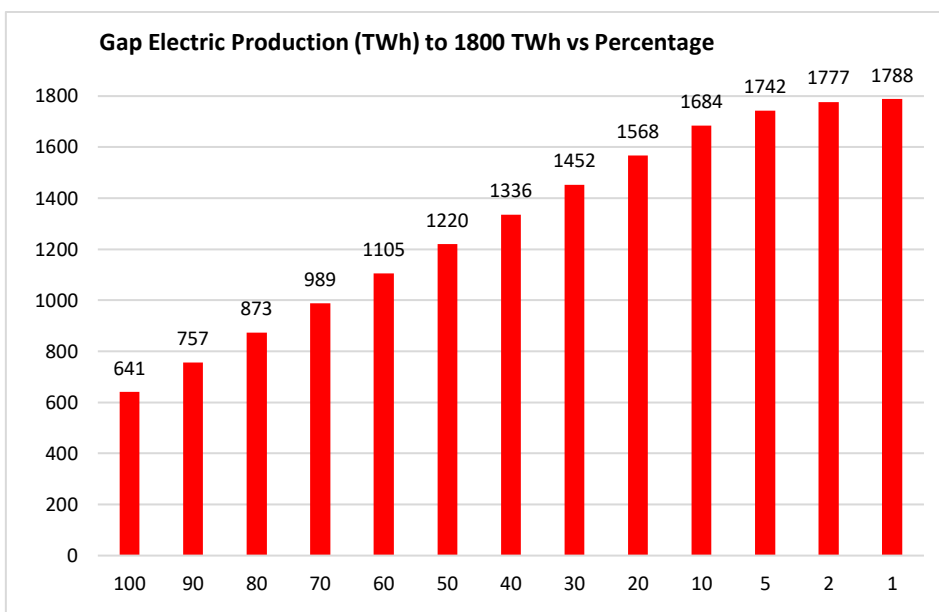
Percentage of Supply [%]

**Gambar 142** Persentase pemanfaatan listrik energi terbarukan di Indonesia [TWh]

Gambar tersebut menunjukkan bahwa gradasi pemanfaatan potensi dapat diperkirakan. Misalnya, ketika faktor pemanfaatan 50%, energi potensial dapat digunakan hingga 216 GWe dari total potensi energi terbarukan, dan dengan estimasi yang sama dapat ditingkatkan menjadi lebih banyak pemanfaatan ketika faktor lebih dari 50% seperti untuk Pemanfaatan 80% hingga 346 GWe. Dengan kata lain, potensi akan berkurang ketika faktor tersebut juga berkurang oleh kondisi apa pun, seperti pasokan potensial 30% dan energi dapat memasok hingga 130 GWe. Perkiraan serupa untuk faktor pemanfaatan potensi untuk produksi listrik yang dikonversi ditunjukkan pada **Gambar 166**. Gambar tersebut menunjukkan persentase pemanfaatan

potensi Energi Terbarukan listrik di TWh. Untuk potensi utilisasi 100% diberikan nilai estimasi sebesar 1159 TWh, dan bila faktor potensial diturunkan menjadi 50% akan memberikan hingga 580 TWh serta bila faktor utilisasi 30%, kontribusinya menjadi 348 TWh. Estimasi ini penting untuk mengukur kapasitas kontribusi energi terutama untuk program NZE yang fokus pada peningkatan energi terbarukan.

Seperti yang telah disebutkan, program *Net Zero Emission* mensyaratkan kebutuhan listrik pada tahun 2060 sekitar 1800 Terawatt Hours (TWh). Permintaan yang meningkat ini harus dipasok oleh energi baru dan terbarukan (EBT) sebagai target program NZE sekitar 100% energi baru dan terbarukan. Dengan asumsi semua kontribusi berasal dari energi terbarukan yaitu 100% energi terbarukan dalam program NZE. Oleh karena itu 1800 TWh harus dipertahankan dengan energi terbarukan dari seluruh potensi sumber energi di Indonesia.

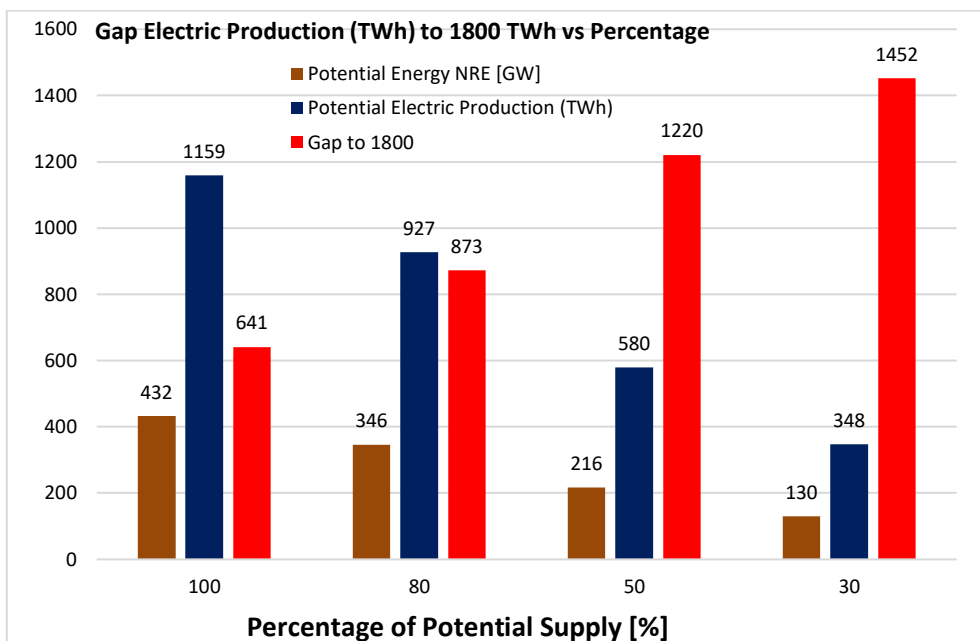


Percentage of Supply [%]

**Gambar 143** Gap listrik berdasarkan pada persentase pemanfaatan energi terbarukan [TWh]

Diperkirakan untuk utilisasi potensial 100% nilai estimasi sebesar 1159 TWh, dan bila faktor potensial diturunkan menjadi 50% akan memberikan hingga 580 TWh serta bila faktor utilisasi 30%, kontribusinya hingga 348 TWh. Ketika permintaan energi untuk program NZE pada tahun 2060 sekitar 1800

TWh, diperkirakan ada kekurangan atau kekurangan pasokan energi. Kesenjangan atau *gap* listrik berdasarkan faktor pemanfaatan energi terbarukan ditunjukkan pada **Gambar 167**. Pada kasus 100% faktor pemanfaatan energi terbarukan, masih menunjukkan kekurangan pasokan energi sekitar 641 TWh, dan kesenjangan akan meningkat ketika faktor pemanfaatan berkurang, misalnya, ketika faktor pemanfaatan adalah 50%, kesenjangannya akan menjadi sekitar 1220 TWh dan seterusnya.



**Gambar 144** Gap listrik berdasarkan pada beberapa persentase pemanfaatan energi terbarukan

Secara ringkas untuk beberapa faktor pemanfaatan dan kesenjangan pasokan energi ditunjukkan pada **Gambar 168** dengan nilai 30%, 50%, 80%, dan 100%. Blok hijau menunjukkan potensi energi terbarukan di GWe, blok biru tua menandakan produksi listrik di TWh dan blok merah dianggap sebagai pasokan energi gap. Gambar tersebut menunjukkan besarnya perkiraan beberapa faktor pemanfaatan energi dan kesenjangan energi yang harus dipenuhi oleh energi terbarukan untuk NZE. Energi nuklir sebagai bagian dari energi baru dan terbarukan berkontribusi pada bauran energi nasional mulai tahun 2035-2040 untuk kontribusi PLTN sekitar 8-10 GWe kapasitas listrik di jaringan. Berdasarkan statistik bahwa untuk membangun PLTN kelas 1 GWe membutuhkan waktu pembangunan sekitar 5-7 tahun, diperkirakan kebutuhan waktu pada tahun 2030-2032 PLTN harus beroperasi

untuk kelas PLTN 1 GWe pertama untuk satu unit atau *double unit on grid* setiap tahunnya, yang berarti PLTN harus dibangun mulai tahun 2025-2027. Selain itu, untuk tahap persiapan serta perijinan membutuhkan waktu 2-5 tahun. Program nuklir harus dilaksanakan mulai dari perencanaan, persiapan dan investasi serta penyiapan sumber daya manusia dan beberapa infrastruktur lain untuk program energi nuklir.

Mengacu pada **Gambar 149** dan **Gambar 150** yang menggambarkan bahwa Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) membutuhkan kapasitas terpasang paling rendah sebesar 211 GWe diikuti oleh pembangkit listrik tenaga sampah, panas bumi dan sebagainya, dan pembangkit listrik tenaga surya membutuhkan kapasitas terpasang paling tinggi sekitar 765 GWe untuk menghasilkan produksi listrik 1500 TWh sebagai tambahan tenaga listrik mencapai 1800 TWh pada tahun 2060. Terlihat dari rasio tersebut, PLTN memiliki rasio terendah (0,7) dan solar PV memiliki rasio tertinggi (2,52) dibandingkan dengan PLTU Batubara serta rasio Pembangkit Listrik Tenaga Angin sebesar 1,8 dan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) adalah 1,43. Analisis diperlukan untuk melihat opsi terbaik untuk menggantikan pembangkit listrik tenaga batubara terutama untuk produsen listrik beban dasar. Berdasarkan analisis faktor kapasitas masing-masing pembangkit, kontribusi terbesar adalah energi nuklir yang meningkat dari 247 TWh (16,5%) menjadi 315 TWh (21%) berdasarkan total penambahan daya sebesar 1500 TWh. Berdasarkan data LCOE, biaya produksi listrik di Eropa sekitar 42 USD/MWh hingga 102 USD/MWh (85 % faktor kapasitas PLTN dan tingkat diskonto 7 %). LCOE di AS sekitar 71 dengan tingkat diskon 7% dan LCOE di Asia sekitar 50 USD/MWh hingga 87 USD/MWh. LCOE untuk tipe SMR diperkirakan memiliki nilai rata-rata 60 USD/MWh hingga 90 USD/MWh. Ini dapat digunakan untuk permintaan energi kecil, daerah terpencil atau pulau, zona industri tertentu atau kompleks industri.

Penggunaan PLTN untuk kawasan industri akan tergantung pada skala atau kebutuhan listrik yang berkisar antara 15 sampai 2,4 GWe. Estimasi kebutuhan listrik PLTN tersebut ditunjukkan pada Tabel 15 dan ringkasan pemanfaatan skala daya PLTN dan tipe reaktor. Potensi pemanfaatan PLTN untuk program de-dieselisasi akan tergantung pada skala atau kebutuhan listrik yang berkisar antara 0,6 MWe sampai dengan 550 MWe kebutuhan listrik yang ditabulasi pada pada **Tabel 17**. Estimasi *share* listrik dari PLTN setiap pulau yang menunjukkan Pulau Jawa akan memiliki listrik sekitar 214



TWh, Pulau Sumatra diperkirakan menggunakan 64 TWh serta pulau lainnya Kalimantan, Sulawesi, dan sisanya akan menggunakan 14,4 TWh, 16,7 TWh dan 14,2 TWh, masing-masing untuk 324 TWh PLTN akan sama dengan sekitar 46 GWe kapasitas listrik PLTN. Estimasi kapasitas terpasang tiap pulau menunjukkan Pulau Jawa membutuhkan 30,3 GWe, Pulau Sumatra 9 GWe dan pulau lainnya membutuhkan kapasitas terpasang 2-2,4 GWe. Kebutuhan energi untuk program NZE pada tahun 2060 sekitar 1800 TWh, dan perkiraan pemanfaatan potensi 100% sama dengan 1159 TWh yang menunjukkan adanya kekurangan atau kesenjangan pasokan energi sekitar 641 TWh, dan kesenjangan tersebut akan semakin meningkat ketika faktor pemanfaatannya terpenuhi. Mengurangi kesenjangan pasokan energi dapat dipasok oleh energi nuklir maupun bahan bakar fosil rendah emisi dan tambahan potensi terbarukan harus tersedia.

### 5.3 PLTN untuk Listrik dan Ko-generasi

*Roadmap* program nol emisi CO<sub>2</sub> bersih pada tahun 2060 telah diumumkan untuk memenuhi perkiraan permintaan energi nasional dan mengadopsi program emisi nol bersih CO<sub>2</sub> yang menunjukkan program energi hijau masa depan yang ambisius di Indonesia. Hal ini menunjukkan bahwa kebijakan tersebut ingin memperkuat sumber energi hijau yang berbasis pada sumber daya energi baru dan terbarukan (EBT). Kontribusi EBT akan dominan dan pada saat yang sama energi fosil akan berkurang secara bertahap sebelum tahun 2060. Energi nuklir sebagai bagian dari energi baru dan terbarukan akan berkontribusi dalam bauran energi nasional pada tahun 2040. Pemanfaatan energi nuklir dapat dibagi menjadi dua bagian secara umum, yaitu aplikasi energi dan non-energi. Untuk aplikasi energi, termasuk untuk Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) dan aplikasi kogenerasi energi, termasuk desalinasi air, produksi hidrogen, untuk aplikasi gasifikasi dan pencairan batu bara (*coal gasification*) dan *liquefaction* dan aplikasi pemulihan minyak yang disempurnakan, *enhanced oil recovery* (EOR). Pemanfaatan PLTN di dunia dan kemajuan teknologi pada program PLTN telah ditingkatkan dengan lebih dari 65 tahun komersialisasi PLTN di dunia.

Daya saing ekonomi PLTN telah ditunjukkan dengan mengadopsi LCOE untuk teknologi tenaga besar dan SMR. Sebagai fitur PLTN umum, ini juga dapat digunakan untuk mengurangi produksi CO<sub>2</sub> untuk menggantikan

penuaan pembangkit berbahan bakar fosil dan pembangkit listrik tenaga diesel di daerah terpencil dan terisolasi. Sebagai bagian dari fleksibilitas PLTN, dapat diintegrasikan dengan sistem terbarukan sebagai sistem energi hibrida dan beberapa pembangkit listrik pengikut beban. Reaktor kecil dan menengah atau modular (SMR) adalah pilihan untuk memenuhi kebutuhan pembangkit listrik yang fleksibel untuk rentang pengguna dan aplikasi yang lebih luas. SMR, dapat digunakan sebagai pembangkit tunggal atau multi-modul, menawarkan kemungkinan untuk menggabungkan nuklir dengan sumber energi alternatif, termasuk energi terbarukan. Mengadopsi teknologi maju SMR sejalan dengan teknologi ini seperti keterjangkauan yang lebih baik dari segi ekonomi, untuk waktu konstruksi dapat dilakukan dalam waktu yang lebih singkat karena konsep modularitas. Bagi pengguna, teknologi ini dapat digunakan dalam jangkauan pemanfaatan yang lebih luas karena penerapannya yang fleksibel untuk daerah terpencil maupun untuk jaringan kecil. Untuk lokasi konstruksi, karena daya yang kecil, diperlukan tapak yang jauh lebih kecil sehingga fleksibilitas lokasi dapat diperoleh untuk mengurangi zona perencanaan darurat. Teknologi nuklir kogenerasi dapat diadopsi untuk produksi hidrogen, desalinasi air, EOR, dan program gasifikasi dan pencairan batu bara.

#### **5.4 Pemanfaatan PLTN *Small Modular Reactor (SMR)***

Reaktor berukuran kecil dan menengah atau modular merupakan pilihan untuk memenuhi kebutuhan pembangkit listrik yang fleksibel untuk rentang pengguna dan aplikasi yang lebih luas. Reaktor modular kecil, dapat digunakan sebagai pembangkit tunggal atau multi-modul, menawarkan kemungkinan untuk menggabungkan nuklir dengan sumber energi alternatif, termasuk energi terbarukan. Mengadopsi teknologi maju SMR sejalan dengan teknologi ini seperti keterjangkauan yang lebih baik dari segi ekonomi, untuk waktu konstruksi dapat dilakukan dalam waktu yang lebih singkat karena konsep modularitas. Bagi pengguna, teknologi ini dapat digunakan dalam jangkauan pemanfaatan yang lebih luas karena penerapannya yang fleksibel untuk daerah terpencil maupun untuk jaringan kecil.

Untuk lokasi konstruksi, karena daya yang kecil, diperlukan tapak yang jauh lebih kecil sehingga fleksibilitas lokasi dapat diperoleh untuk

mengurangi zona perencanaan darurat. Sebagai fitur PLTN umum, ini juga dapat digunakan untuk mengurangi produksi CO<sub>2</sub> untuk menggantikan penuaan pembangkit berbahan bakar fosil dan pembangkit listrik tenaga diesel di daerah terpencil dan terisolasi. Sebagai bagian dari fleksibilitas PLTN, dapat diintegrasikan dengan sistem terbarukan sebagai sistem energi hibrida dan beberapa pembangkit listrik pengikut beban. Analisis LCOE PLTN telah dilakukan dan menunjukkan bahwa LCOE PLTN di Eropa adalah sekitar 42 USD/MWh hingga 102 USD/MWh, dan LCOE di AS dapat dilihat sekitar 71. Analisis serupa telah dilakukan untuk LCOE di Asia yang menunjukkan bahwa LCOE di Asia sekitar 50 USD/MWh sampai dengan 87 USD/MWh.

Nilai tersebut untuk analisis ini didasarkan pada kapasitas reaktor daya reaktor besar dengan laju daya 950–1700 MWe. Perusahaan nuklir tingkat lanjut sedang merancang pembangkit yang biayanya sangat kompetitif di pasar energi yang didorong terutama oleh ekonomi. LCOE untuk tipe SMR diperkirakan memiliki nilai rata-rata 60 USD/MWh dan nilai maksimum LCOE sekitar 90 USD/MWh. Ini dapat digunakan untuk permintaan energi kecil, daerah terpencil atau pulau, zona industri tertentu atau kompleks industri.

## **5.5 PLTN Untuk Kawasan Industri Khusus dan De-dieselisasi**

Evaluasi berdasarkan strategi pemetaan skala kapasitas listrik PLTN untuk kebutuhan listrik di Indonesia, analisis dan pemetaan pemanfaatan PLTN untuk tujuan khusus kawasan ekonomi atau industri khusus dan program de-dieselisasi yang merupakan beberapa program proyek nasional untuk elektrifikasi daerah terpencil dan zona terisolasi. Pemanfaatan analisis PLTN untuk kawasan khusus telah dilakukan seperti untuk kawasan industri. Berdasarkan 26 kawasan industri, memiliki rentang kebutuhan listrik 10 MWe hingga kisaran daya 1000 MWe. Dari daftar zona untuk zona industri lain non-RPJMN membutuhkan kebutuhan listrik dari 15 MWe hingga 2,4 GWe tergantung wilayahnya.

Penggunaan PLTN untuk kawasan industri akan tergantung pada skala atau kebutuhan listrik yang berkisar antara 10 hingga 2,4 GWe. Pemanfaatan analisis PLTN untuk kawasan khusus telah dilakukan seperti untuk program de-dieselisasi. Penyebaran program de-dieselisasi sangat tersebar di seluruh pulau di Indonesia dan daerah tersebut memiliki kebutuhan listrik tergantung daerahnya untuk kebutuhan listrik berkisar antara 0,6 MWe sampai dengan

550 MWe. Maluku memiliki permintaan listrik tertinggi untuk program ini dan diikuti oleh Papua, Sulteng, dan Kalbar sebagai daerah permintaan listrik yang besar. Potensi pemanfaatan PLTN untuk program de-dieselisasi akan tergantung pada skala atau kebutuhan listrik yang berkisar antara 0,6 MWe sampai dengan 550 MWe kebutuhan listrik.

## 5.6 Estimasi Pemenuhan Gap Produksi Listrik Program NZE EBT

Dalam hal kebutuhan energi untuk program NZE pada tahun 2060 sekitar 1800 TWh, diperkirakan terdapat kekurangan atau kesenjangan pasokan energi dari energi terbarukan. Dalam hal faktor pemanfaatan energi terbarukan 100%, pasokan energi tidak mencukupi sekitar 641 TWh, dan kesenjangan akan meningkat ketika faktor pemanfaatan berkurang, seperti faktor pemanfaatan 50%, kesenjangan akan menjadi sekitar 1220 TWh dan segera. Hasil menunjukkan perkiraan besarnya beberapa faktor pemanfaatan energi dan kesenjangan energi yang harus dipenuhi oleh energi terbarukan untuk NZE.

Kesenjangan pasokan energi dapat dipasok oleh energi nuklir maupun bahan bakar fosil rendah emisi dan tambahan potensi terbarukan harus tersedia. Transisi energi menjadi sangat penting tidak hanya mengejar komposisi energi baru terbarukan dalam program NZE, tetapi keamanan pasokan listrik juga sangat penting ditambah lagi rencana tahapan *phase down* penggunaan PLTU secara bertahap yang harus disiapkan pembangkit pengganti yang setara secara kapasitas daya dan produksi listrik yang aman dari suplai yang bersifat *based load* seperti sifat pembangkit PLTU yang *based load*, sehingga jangan sampai pembangkit yang bersifat intermitansi yang menggantikan.

## 5.7 Distribusi Pembangunan PLTN Program NZE Indonesia

Seperti disebutkan sebelumnya bahwa energi nuklir berkontribusi sebesar 18 % yang setara dengan 324 TWh pada tahun 2060 sebagai bagian dari program NZE. Dari total 324 TWh itu akan dibagi kontribusi listrik ke masing-masing pulau berdasarkan kebutuhan listrik. Ini menunjukkan Pulau Jawa akan memiliki sekitar 214 TWh listrik dari energi nuklir, sedangkan pulau Sumatera akan menggunakan 64 energi Nuklir dan pulau lainnya Kalimantan,

Sulawesi dan sisanya akan menggunakan 14,4 TWh, 16,7 TWh dan 14,2 TWh, masing-masing. Jika kebutuhan listrik Dalam TWh diubah menjadi kapasitas daya pembangkit listrik, maka akan setara dengan kapasitas daya PLTN sekitar 46 GWe.

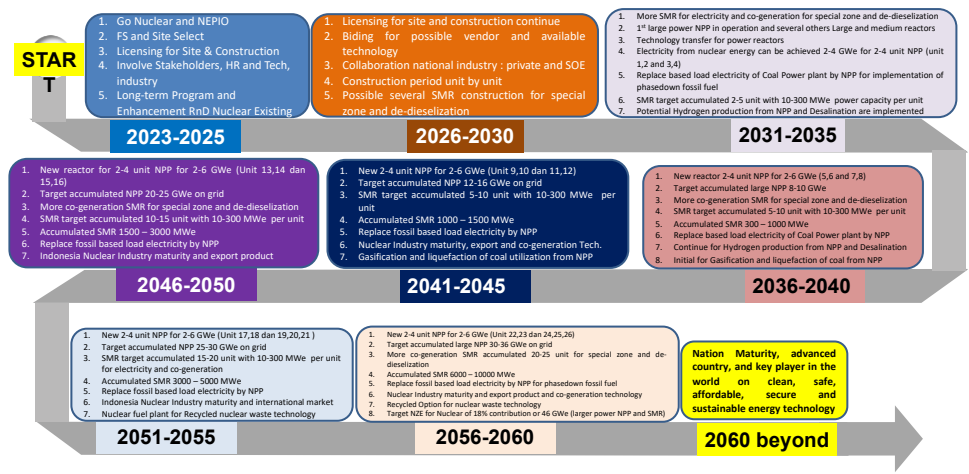
Estimasi kapasitas terpasang untuk masing-masing pulau menunjukkan bahwa Pulau Jawa membutuhkan kapasitas terpasang PLTN sekitar 30,3 GWe, sedangkan Pulau Sumatra membutuhkan 9 GWe dan pulau lainnya membutuhkan kapasitas terpasang 2-2,4 GWe. Estimasi ini tentunya akan dinamis mengalami perubahan seiring dengan perubahan perencanaan keenergian dan kelistrikan nasional ditambah lagi dengan pertumbuhan ekonomi yang mengalami peningkatan. Estimasi ini dapat dijadikan acuan apabila mengacu pada data statistik saat ini sebagai bahan acuan untuk perkiraan kebutuhan energi dimasa yang akan datang.

## 5.8 Rencana Implementasi dan Peta Jalan PLTN Program NZE

Untuk memenuhi program NZE, energi nuklir sebagai bagian dari energi baru dan terbarukan berkontribusi pada bauran energi nasional mulai tahun 2035-2040 untuk kontribusi PLTN dengan kapasitas daya sekitar 8-10 GWe yang beroperasi. Diperkirakan pada tahun 2030-2032 PLTN harus beroperasi untuk kelas PLTN 1 GWe pertama untuk unit tunggal atau unit ganda pada jaringan setiap tahunnya. Dengan mempertimbangkan waktu pembangunan PLTN yang harus dibangun mulai tahun 2025-2027 dan beberapa tahap persiapan serta perijinan selama 2-5 tahun seperti pada **Gambar 169**. Tahun 2023-2025 menjadi tahapan krusial untuk persiapan awal dengan posisi negara dalam program nuklir nasional khususnya dalam program NZE 2060 yang telah dicanangkan dari tahun sebelumnya. Program nuklir harus dilaksanakan mulai dari perencanaan, persiapan dan investasi serta penyiapan sumber daya manusia dan beberapa infrastruktur lain untuk program energi nuklir sebagaimana di jelaskan dalam **Tabel 18** untuk Rencana Tonggak Pencapaian (Milestone) Implementasi Energi Nuklir.

Tahapan implementasi program nuklir Indonesia bersifat jangka Panjang dengan tahapan berdasarkan periode lima tahunan dengan program kerja dan target sebagai Peta Jalan Tahapan Implementasi PLTN Program NZE 2060 Indonesia. Pembangunan PLTN mengacu pada kebutuhan listrik setiap kebutuhan beban yang diperkirakan, tahapan pembangunan dan persiapan

sumber daya manusia pelaksana dan pengawasannya. Tipe unit PLTN yang dibangun dapat berupa unit besar dan juga unit yang kecil baik berupa unit tunggal maupun multi-unit di setiap lokasi tapak pembangkit. Sinergisitas dengan pembangkit lain terutama tipe unit yang kecil atau *small modular reactor* (SMR) dapat digunakan sebagai bagian system hibrid dan multi utilisasi pembangkit baik untuk pemnfaatan listrik, maupun program ko-generasi pembangkit seperti desalinasi, produksi hidrogen, dan lainnya.



Gambar 145 Peta jalan tahapan implementasi PLTN Program NZE 2060 Indonesia

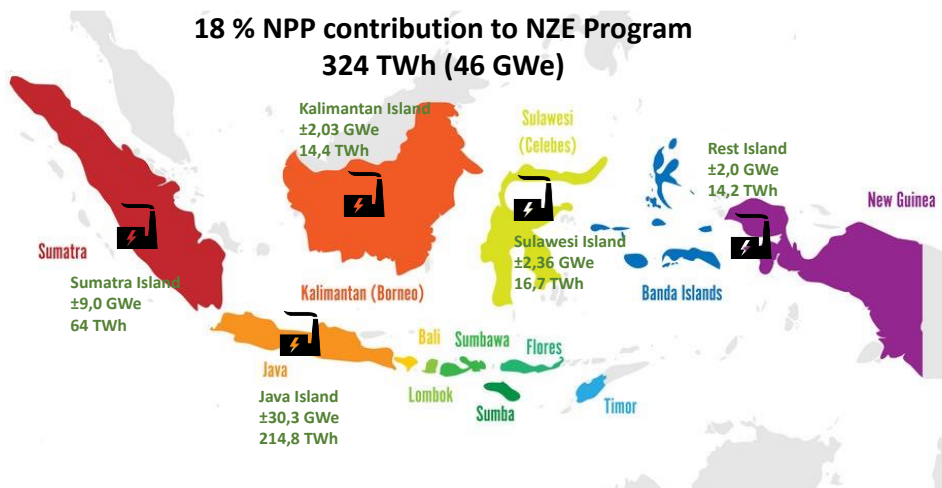
Peta jalan implementasi PLTN ini diharapkan dapat menjadi acuan umum dalam memenuhi kebutuhan listrik nasional dan saat bersamaan dapat memenuhi program energi bersih dalam rangka pengurangan emisi karbon nasional dan dunia. Tahapan lima tahunan ini memberikan gambaran tahapan pencapaian kegiatan dan target yang bertahap dan berkesinambungan sehingga akumulasi hasil pembangunan yang bertahap dalam memenuhi kebutuhan target NZE 2060 yang telah dicanangkan. Selain memenuhi kebutuhan energi nasional dalam rangka mencapai target negeri maju dan industri, diharapkan Indonesia bisa meningkatkan kapasitas teknologi dan sumber daya manusia dengan inovasi dan program industrialisasinya, sehingga secara mandiri kita bisa menghasilkan teknologi sendiri dan memenuhi kebutuhan sendiri serta secara langsung dapat menjadi pemain dalam industri nuklir dunia. Kemandirian energi tercapai, energi bersih terpenuhi dan industri nuklir nasional yang kuat serta dapat menghasilkan teknologi dan inovasi sendiri yang dapat berkontribusi pada

industri nuklir dunia baik dari segi sumber daya manusia yang unggul dan teknologi yang matang di tahun 2060 dan setelahnya.

Rencana implementasi telah dibuat untuk beberapa analisis kasus dan telah dibuatkan peta wilayah kebutuhan listrik. Pemanfaatan PLTN untuk kawasan khusus telah dilakukan seperti untuk kawasan industri atau juga Kawasan ekonomi khusus. Berdasarkan data dari kementerian perindustrian, disebutkan terdapat 26 kawasan industri yang memiliki rentang kebutuhan listrik antara 10 MWe hingga kisaran daya listrik 1000 MWe. Dari daftar zona untuk zona industri lain, non RPJMN membutuhkan kebutuhan listrik dari 15 MWe hingga 2,4 GWe tergantung wilayahnya. Penggunaan PLTN untuk kawasan industri akan tergantung pada skala atau kebutuhan listrik yang berkisar antara 10 hingga 2,4 GWe.

**Tabel 19** Daftar kebutuhan listrik dan tipe unit PLTN yang dibutuhkan zona industri dan program dedieselisasi

No	NPP Type	Power Range
1	SMR-Single	50-100 MW
2	VSMR (Micro)-single	< 10 MW
3	SMR single	10-50 MW
4	SMR Multi/Medium NPP-Single	300-700 MW
5	SMR-Single	100-300 MW
6	Large Reactor/Medium multi	700-1500 MW



**Gambar 146** Peta kebutuhan listrik tiap pulau untuk pemanfaatan PLTN di 2060 Program NZE

Peta berdasarkan **Gambar 170** dapat digunakan sebagai peta rekomendasi dan kebutuhan listrik dalam rangka program pemanfaatan PLTN baik

kebutuhan setiap pulau berdasarkan beban listrik secara data statistik saat ini dan estimasi kebutuhan listrik untuk program zona ekonomi dan industry khusus. Kisaran daya dan jenis reaktor SMR dan *Micro-reactor* untuk program zona ekonomi dan industri khusus dan de-dieselisasi. Untuk program De-dieselisasi, sebaran daerah sangat banyak dan kebutuhan daya juga kecil, sehingga selain PLTN SMR juga VSMR atau *Micro-reactor* yang diperlukan untuk daya yang sangat kecil.

Untuk program implementasi kedua yang akan menjadi rekomendasi didasarkan pada kontribusi energi nuklir sebesar 18 % yang setara dengan 324 TWh pada tahun 2060 sebagai bagian dari program NZE seperti. Dari total 324 TWh itu akan dibagi berdasarkan kontribusi listrik di masing-masing pulau berdasarkan kebutuhan listrik. Ini menunjukkan Pulau Jawa akan memiliki sekitar 214 TWh listrik dari energi nuklir, sedangkan Pulau Sumatra akan menggunakan 64 energi Nuklir dan pulau lainnya Kalimantan, Sulawesi, dan sisanya akan menggunakan masing-masing 14,4 TWh, 16,7 TWh dan 14,2 TWh,. Jika kebutuhan listrik Dalam TWh diubah menjadi kapasitas daya pembangkit listrik, maka akan setara dengan kapasitas daya PLTN sekitar 46 GWe. Estimasi kapasitas terpasang untuk setiap pulau menunjukkan bahwa pulau Jawa membutuhkan kapasitas terpasang PLTN sekitar 30,3 GWe, sedangkan Pulau Sumatra membutuhkan 9 GWe dan pulau lainnya membutuhkan kapasitas terpasang 2-2,4 GWe.

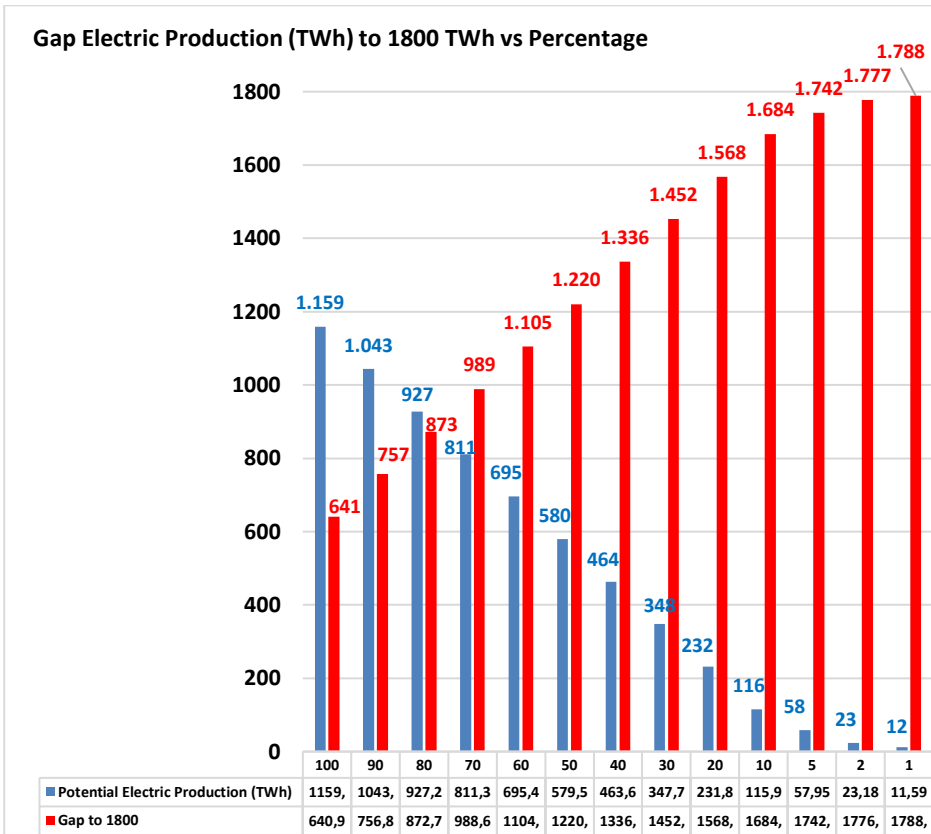
**Tabel 19** Daftar kebutuhan listrik dan unit PLTN yang dibutuhkan setiap pulau

Island	NPP Type	Range [MW]	Unit NPP MW	Power [per-unit]
Java	Medium-Large/SMR combined	700-1500	Multi 1000/SMR	30 or more SMR
Sumatera	Medium-Large/SMR combined	700-1500	Multi 1000/SMR	9 or More SMR
Kalimantan	SMR-Medium	300-700	Multi 500	4
Sulawesi	SMR	10-300	Multi 100	24
The Rest	SMR	10-300	Multi 100	20

Data tersebut dikumpulkan dan dimasukkan ke dalam peta sebagai data acuan untuk implementasi PLTN berikutnya berdasarkan kebutuhan energi pulau dan komposisinya. Taget 18% kontribusi PLTN dalam bauran energi nasional dapat diturunkan menjadi kebutuhan perwilayah berdasarkan kapasitas terpasang pembangkit maupun dalam estimasi produksi listriknya berdaarkan kapasitas faktor pembangkit PLTN. 18% PLTN akan setara dengan 324 TWh atau setara dengan 46 GWe dengan kapasitas faktor PLTN di atas 90%. Pulau jawa menjadi kapasitas terpasang yang paling tinggi karena beban



terbanyak daya berada di Jawa dengan populasi dan sektor industri, jasa, transportasi dan lainnya yang tertinggi. Disusul dengan Pulau Sumatra kemudian Kalimantan dan pulau-pulau lainnya. Pembangunan PLTN akan bergantung pada lokasi tapak yang potensi seismik yang relatif rendah dan stabil. Di utara Jawa mempunyai area yang relatif kecil potensi seismiknya dibandingkan dengan lokasi Jawa bagian selatan, demikian juga di Pulau Sumatra lokasi Sumatra bagian timur dan mengarah ke Pulau Kalimantan mempunyai lokasi tapak yang relatif kecil potensi seismiknya. Lokasi yang muncul sebagai kandidat di Pulau Jawa di sekitar lokasi daerah Jepara atau Jawa bagian utara dan juga di daerah Provinsi Banten. Di Sumatra juga mempunyai potensi strategis selain di Pulau Sumatra, juga di Kepulauan Bangka Belitung mempunyai lokasi yang relatif stabil. Kemudian di daerah Kalimantan secara umum stabil. Di daerah Sulawesi di beberapa daerah juga aktivitas seismiknya dapat dikatakan rendah dan juga di Pulau Papua dan di Nusa Tenggara juga mempunyai potensi tapak yang cocok. Dibandingkan PLTN berdaya besar, PLTN SMR mempunyai fleksibilitas daya dan relatif lebih aman dan lokasi tapak yang relative fleksibel. Sehingga untuk beberapa lokasi di luar Jawa atau populasi yang rendah dapat dibangun PLTN SMR untuk memenuhi kebutuhan daerahnya.



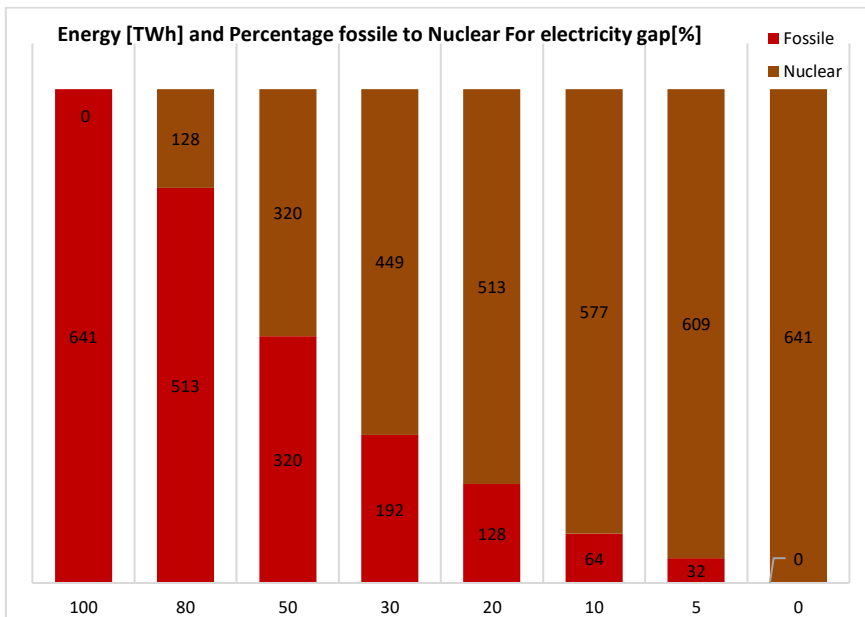
Percentage of Potential Supply [%]

**Gambar 147** Gap listrik berdasarkan pemanfaatan energi terbarukan

Data pada **Tabel 20** dapat digunakan sebagai rekomendasi untuk unit PLTN yang diperkirakan disesuaikan dengan luasan kebutuhan dan karakteristik tipe reaktor di masing-masing pulau. Rencana implementasi ketiga adalah potensi pemanfaatan PLTN untuk program de-dieselsiasi berdasarkan estimasi skala kebutuhan daya dan jenis reaktor yang dibutuhkan dengan disesuaikan dengan kebutuhan listrik masing-masing provinsi atau zona. Daftar kebutuhan infrastruktur ketenagalistrikan untuk Zona de-dieselsiasi di Indonesia disajikan pada **Tabel 16** yang meliputi estimasi pemanfaatan jenis PLTN serta perkiraan jangkauan daya PLTN. Potensi PLTN untuk program de-dieselsiasi akan bergantung pada kebutuhan listrik yang berkisar antara 0,6 MWe sampai dengan 550 MWe kebutuhan listrik. Estimasi kebutuhan listrik PLTN tersebut ditunjukkan pada **Tabel 16** dan ringkasan pemanfaatan skala daya PLTN dan jenis reaktornya ditabulasikan pada **Tabel 17**.

## 5.9 Rencana Pemenuhan Gap Kebutuhan Listrik Program NZE

Rencana implementasi keempat adalah komposisi skenario untuk memenuhi kesenjangan listrik dari pasokan energi terbarukan untuk memenuhi kebutuhan energi yang cukup untuk program energi baru dan terbarukan (EBT) pada tahun 2060. Seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 171** bahwa kesenjangan listrik menjadi meningkat ketika faktor pemanfaatan energi terbarukan menurun. Perlu diperhatikan bahwa faktor pemanfaatan 100% dari perkiraan potensi yang ada masih belum mencukupi untuk memenuhi kebutuhan energi. **Gambar 172** menunjukkan skenario untuk memenuhi kesenjangan pasokan listrik dari bahan bakar fosil dan energi nuklir. Ketika pasokan diperkirakan 100% NZE berdasarkan EBT, kontribusi nuklir yang lebih tinggi atau kontribusi nuklir 100% lebih disukai, tetapi ketika energi campuran diperkirakan akan diputuskan, beberapa kontribusi fosil dapat dianggap sebagai kontributor. Jika tidak, diperlukan beberapa eksplorasi energi terbarukan untuk menemukan potensi energi baru untuk mengisi kesenjangan tersebut.

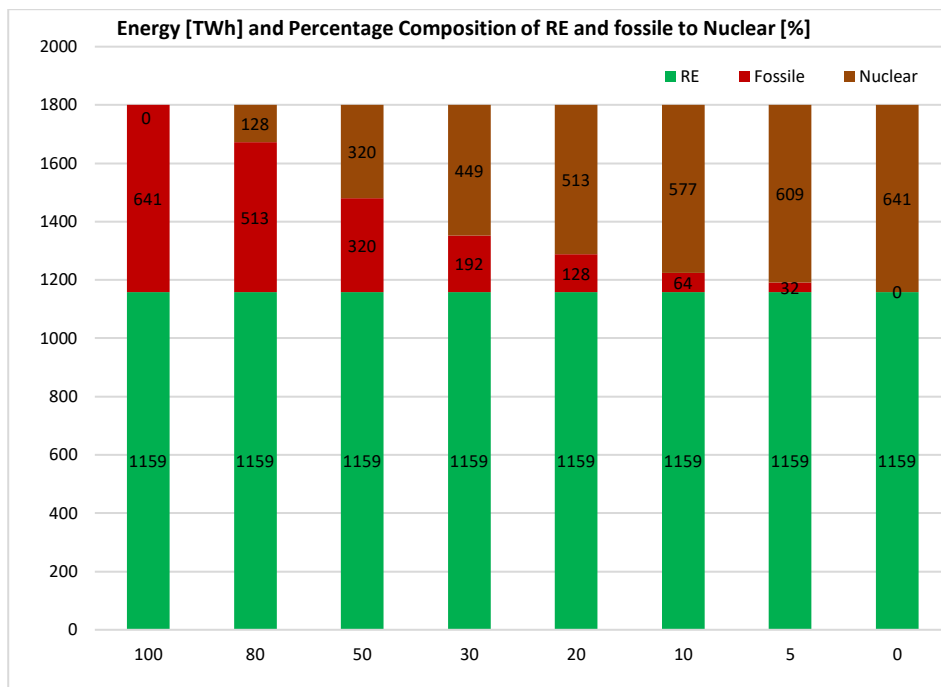


Percentage of Potential Supply [%]

**Gambar 148** Energi [TWh] dan persentase suplai fosil terhadap nuklir untuk pemenuhan gap energi [%]

Ketika kontribusi energi campuran diharapkan, **Gambar 173** menunjukkan hasil skenario dari kontribusi energi terbarukan (ET), energi

Fosil dan energi Nuklir berdasarkan faktor pemanfaatan. Persentase tersebut menunjukkan kontribusi bahan bakar fosil terhadap energi nuklir dan terbarukan. Kontribusi ET ditetapkan konstan dengan asumsi bahwa faktor pemanfaatan 100% dari potensi energi terbarukan (ET) diadopsi (1159 TWh) dan energi fosil serta energi nuklir adalah variabel, tergantung pada kontribusi fosil. Ketika kontribusi EBT 100%, energi terbarukan dan nuklir menjadi 100%, ketika kontribusi fosil nol, maka kontribusi energi nuklir untuk memenuhi kesenjangan tersebut menjadi 641 TWh seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 173**.



**Percentage of Potential Supply [%]**

**Gambar 149** Energi [TWh] dan persentase fosil dan energi terbarukan terhadap nuklir untuk pemenuhan gap energi [%]

### 5.10 Organisasi Pelaksana Implementasi Energi Nuklir

Rencana Implementasi terakhir dalam program NZE sebagai bagian dari energi baru dan terbarukan, energi nuklir diperkirakan telah beroperasi dan berkontribusi pada bauran energi nasional mulai tahun 2035-2040 berdasarkan beberapa skenario dan waktu pembangunan PLTN kelas 1 GWe, membutuhkan waktu konstruksi sekitar 5-7 tahun sementara daya yang lebih

kecil akan membutuhkan waktu yang lebih sedikit, serta beberapa proses perizinan dan studi kelayakan, oleh karena itu PLTN harus diimplementasikan sebagai program NZE mulai tahun 2023-2024 hingga dapat beroperasi awal tahun 2030-an, apabila tahap pembangunan sekitar 5-7 tahun, diperkirakan apabila tahun 2025 mulai dibangun, sekitar 2030-2032 dapat segera beroperasi secara komersial PLTN pertama sekelas 1000 MWe atau lebih atau dapat juga dalam bentuk beberapa unit SMR. Dalam penyelenggaraan tenaga nuklir, diperlukan suatu organisasi khusus yang tugasnya sebagai pelaksana teknis implementasi energi nuklir khususnya dalam program NZE nasional.

Secara histori, Indonesia pada tahun 1968 mengumumkan niatnya untuk melaksanakan program PLTN dengan beberapa studi telah dilakukan dan telah membentuk panitia kesiapan kemampuan Indonesia untuk membangun PLTN tahun 1972, sebuah komisi persiapan pembangunan PLTN (Permana, 2012; Wikipedia, 2016). Pada tahun 1980-an, Indonesia memiliki niat untuk membangun PLTN pertama yang hampir bersamaan dengan Korea untuk Industri Nuklir dimulai (Amir, 2010; Permana, 2012), tetapi program tersebut mengalami penundaan karena diperkirakan melihat PLTN saat itu belum mendesak karena sumber daya energi seperti minyak bumi masih banyak dan masuk dalam fase emas atau *golden age* minyak Indonesia. Secara aplikasi dan sudah secara komersial dilakukan, penerapan energi nuklir dalam penerapan non-listrik sudah diterapkan untuk keperluan pertanian, kedokteran, rumah sakit, dan sebagainya. Namun untuk produksi listrik sebagai pembangkit listrik, Indonesia masih harus menunggu lebih dari 50 tahun sejak komite implementasi pertama PLTN dibentuk pada tahun 1970-an sampai saat ini belum terwujud.

Pada prinsipnya organisasi pelaksana PLTN merupakan organisasi yang mengaplikasikan energi nuklir PLTN untuk fase komersial bukan lagi fase riset dan pengembangan (RnD) teknologi. Fase RnD merupakan tugas dari organisasi riset dalam hal ini Batan (Badan Tenaga Nuklir Nasional) yang saat ini berfusi menjadi Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) yang dalam pelaksanaannya dapat berkolaborasi dengan universitas atau sekolah tinggi dan Lembaga riset lainnya yang terkait. Fase komersial PLTN harus dikelola oleh Lembaga pemerintah non-penelitian dan berupa badan organisasi yang mengelola aplikasi energi nuklir untuk komersial di bawah koordinasi kementerian ESDM dan bekerja sama dengan utilitas atau pengguna dari PLTN

secara komersial misalnya perusahaan di bawah kementerian BUMN seperti PT PLN dan BUMN lainnya yang terkait dengan keenergian.

Organisasi pelaksana berupa NEPIO (*nuclear energy programme implementing organization*) atau Organisasi Pelaksana Program Tenaga Nuklir yang bertugas melaksanakan program tenaga nuklir mulai dari perencanaan, persiapan dan investasi serta menyiapkan sumber daya manusia dan beberapa infrastruktur lain untuk program tenaga nuklir. Organisasi NEPIO ini adalah rekomendasi dari International Atomic Energy Agency (IAEA) meskipun bukan keharusan dalam implementasi program nuklir sebuah negara. Organisasi NEPIO bisa berupa organisasi apapun dan dalam struktur apapun tetapi tugasnya terkait dengan tugas NEPIO. Organisasi ini dapat secara struktural bertanggung jawab langsung pada presiden atau di bawah koordinasi kementerian energi dan sumber daya mineral (ESDM), dapat juga di bawah koordinasi khusus di bawah Dewan Energi Nasional (DEN) atau juga merupakan konsorsium gabungan dari organ khusus melalui kerja sama kementerian ESDM dan kementerian terkait lainnya.

Rekomendasi ini sebagai hal yang positif dan membantu secara terorganisir agar program nuklir dapat terimplementasikan secara efektif dan terarah. Organisasi ini bisa fleksible secara struktur, tetapi secara esensi dapat memenuhi target pelaksanaan 19 program infrastruktur persiapan dan pelaksanaan PLTN seperti digambarkan pada **Gambar 23** dari mulai isu infrastruktur terkait posisi pemerintah atau negara, keselamatan, majemen, sumber daya manusia sampai pada keterlibatan semua *stakeholder* terkait dalam mengimplementasikan program nuklir nasional. Personil NEPIO atau organisasi serupa dapat berupa gabungan personil dari pemerintah, pusat penelitian, akademisi, profesi, badan usaha, swasta, dan wakil masyarakat yang mempunyai perhatian terhadap implementasi PLTN secara komersial untuk kemaslahatan nasional. Sehingga *stakeholder* terkait dapat merasa dilibatkan dalam usaha implementasi PLTN komersial di Indonesia dan melihat NEPIO merupakan lembaga representatif yang tentunya harus bergerak secara efektif dan efisien untuk kepentingan nasional dan dalam rangka mensukseskan program NZE Indonesai sebagai bagian dari komunitas global agar Indonesia dan dunia lebih baik lagi.

# PENUTUP

Buku ini menjelaskan tema-tema yang difokuskan pada potensi implementasi energi nuklir dan keuntungannya serta pemanfaatannya, khususnya dalam pemenuhan program NZE. Dengan buku ini, diharapkan dapat memberikan informasi dan gambaran umum yang berkaitan dengan peranan penting energi nuklir, potensi pemanfaatan energi nuklir dari mulai aspek non-proliferasi nuklir, aspek pengembangan reaktor maju dan generasi ke-IV, dan bagaimana energi nuklir mempunyai peran strategis dalam pemenuhan program *Net Zero Emission* (NZE), dalam rangka pemenuhan target pemanfaatan energi dari sumber energi baru dan terbarukan yang bersih, ramah lingkungan, handal dari segi keamanan suplai energi, aman, dan terjangkau. Permasalahan energi menjadi prioritas akan tetapi berkontribusi banyak bagi pemanasan global sehingga menghasilkan kebijakan global dengan berbagai skenario Emisi Nol Bersih dengan target penerapan program NZE masing-masing negara yang berbeda-beda, tetapi secara umum rata-rata pada sekitar tahun 2050, sedangkan Indonesia target program NZE-nya tercapai di 2060.

Melalui program NZE ini, kontribusi EBT akan dominan dan pada saat yang sama energi fosil akan berkurang secara bertahap sebelum tahun 2060. Pemanfaatan energi nuklir untuk aplikasi energi di antaranya untuk pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) dan aplikasi kogenerasi energi seperti desalinasi air, produksi hidrogen, untuk aplikasi gasifikasi dan pencairan batubara dan peningkatan pemulihan minyak (EOR) yang dapat digunakan untuk program NZE sebagai bagian multifungsi pemanfaatan energi. Implementasi program nuklir dapat memenuhi kebutuhan daya secara nasional maupun beberapa program pemerintah di antaranya untuk daerah industri dan ekonomi khusus dan program de-dieselisasi. Dalam program NZE, energi nuklir sebagai bagian dari energi baru dan terbarukan berkontribusi pada bauran energi nasional mulai tahun 2040 untuk kontribusi NPP secara akumulatif 8-10% dan demikian akan terus mengalami kenaikan. Dengan demikian pembangunan dan persiapan harus segera dilakukan di tahun 2023-2025 ini. Program nuklir harus dilaksanakan mulai dari perencanaan, persiapan dan investasi serta penyiapan sumber daya manusia dan beberapa infrastruktur lain untuk program energi nuklir. Energi nuklir

berkontribusi sebesar 18 % yang setara dengan 324 TWh pada tahun 2060 sebagai bagian dari program NZE. Yang setara dengan kapasitas daya 46 GWe. Kontribusi energi terbarukan (ET) untuk 100% dari potensi ET sebesar 430 GWe atau setara 1159 TWh dan memberikan gap kebutuhan sekitar 641 TWh menuju target sekitar 1800 TWh di 2060. Untuk memenuhi gap tersebut diperlukan pengembangan potensi ET dan memasukan energi nuklir sebagai energi baru dalam mengisi gap tersebut serta kontribusi energi fosil rendah karbon. Dalam implementasi yang efektif dan terkendali, diperlukan suatu NEPIO atau Organisasi Pelaksana Program Energi Nuklir atau organisasi setara yang mempunyai tugas melaksanakan program implementasi energi nuklir semanjak dari perencanaan, persiapan, dan investasi serta menyiapkan sumber daya manusia dan beberapa infrastruktur lain, serta sinergi antar *stakeholder* terkait.



# UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah segala puji bagi Allah Tuhan Yang Maha Kuasa yang dengan perkenan dan rahmatnya buku ini telah hadir didepan bapak danibu sekalian. Dengan diterbitkannya buku orasi ilmiah ini, penulis mengucapkan terima kasih banyak dan salam hormat kepada

1. Kedua orang tua saya, almarhum bapak tercinta, Bapak Amung Setiawan yang senantiasa memberi semangat dan selalu menunggu jabatan akademik Guru Besar diterima penulis, dan juga Ibunda Tercinta Ibu Hj. Nining Darnegsih yang kasih sayangnya tak pernah putus dan selalu mendoakan dalam keadaan apapun untuk anaknya senantiasa sehat dan sukses penuh keberkahan.
2. Kepada istri tercinta Nilam Bekti Sumardhani, B.Eng, M.Eng memberikan kekuatan dan kehangatan serta kesabarannya dalam proses pembuatan buku ini. Buat Anak-anakku tercinta, Rasyid Abdurrahman, Raisya Salma Tsabita, dan Rei Fathan Syahidan yang selalu memberi motivasi dan kekuatan.
3. Kepada Para Pembimbing saya, Prof. Zaki Suud selaku pembimbing sarjana Fisika di ITB, Prof. Hiroshi Sekimoto, Prof. Toru Obara, Prof. Naoyuki Takaki dan Prof. Liem Peng Hong sebagai pembimbing magister dan doktor di Nuclear Engineering Department, Tokyo Institute of Technology. Prof. Masaki Saito dan Prof. Mitsutoshi Suzuki sebagai promotor postdoctoral di Japan Atomic Energi Agency (JAEA). Kepada Bapak Almarhum Prof. Dr. Ir. Kuntoro Mangkusubroto, M.Eng dan bapak Yos Sunitiyoso, S.T, M.Eng., Ph.D. atas perhatian dan diskusi hangatnya sebagai inspirator dalam menyelesaikan program MBA di SBM ITB.
4. Para profesor yang telah memberikan rekomendasi kepada saya, yaitu Prof. Hiroshi Sekimoto (Emiritus Tokyo Tech. Inst. (TIT), Prof. Sumer Sahin (Mechanical and Nuclear Engineering , Bahçeşehir Univ. Turki), Prof. Naoyuki Takaki (Dept of Nuclear Safety Engineering, Tokyo City Univ. Jepang), Prof. Mitsutoshi Suzuki (Graduate School of Engineering Univ. of Tokyo, Jepang), Prof. Yudi Azis, S.Si, S.E. S.Sos Fakultas Ekonomi dan Bisnis, UNPAD, Prof. Zaki Suud (KK Fisika Nuklir Biofisika, FMIPA ITB), Prof. Abdul Waris (KK Fisika Nuklir Biofisika, FMIPA ITB), Prof. Brian Yulianto (KK Material Fungsional Maju, FTI ITB), Prof. Satria

Bijaksana (KK Geofisika Global, FITB ITB), Prof. Dr.Ir. Deendarlianto, S.T., M.Eng, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada.

5. Para tamu undangan yang dalam kesibukannya berkenan hadir dalam orasi ilmiah guru besar ini yang memberi semangat kepada penulis.
6. Para dosen di Kelompok Keahlian (KK) Fisika Nuklir dan Biofisika (FNB) FMIPA ITB, para dosen di Fisika dan FMIPA.
7. Para dosen dan peneliti di Pusat Penelitian (PP) Energi Baru Terbarukan, Pusat Pemberdayaan Pedesaan (P2D) ITB
8. Kepada keluarga besar Abah Amung Setiawan dari Bandung dan keluarga Besar Kakung Ismu Pamungkas dari Purworejo
9. Kepada Keluarga Besar Ikatan Alumni Lemhanas (IKAL) Bandung, Jawa Barat dan Nasional, Kepada Keluarga Besar ICMI dan Pemuda ICMI nasional dan Jawa Barat, IA ITB Pusat, KAHMI Pusat dan Jawa Barat, Bandung dan ITB serta Sabang-17. Para Pengurus dan Pembina YPM Salman ITB.
10. Kepada mahasiswa baik S-1, S-2, dan S3 serta posdoktoral, juga Tenaga Pendidikan di KK FNB.
11. Kepada teman-teman Solidaritas Dekade 9X, teman-teman ITB Angkatan 1996, Fisika angkatan 1996, Teman-teman ENEMBA 6 SBM ITB.
12. Tidak lupa kepada kolega lainnya yang telah memberikan inspirasi dan semangat serta dukungannya sehingga akhirnya buku ini dapat diselesaikan.

Demikian ucapan terima kasih Penulis ucapkan dengan tulus ikhlas sebagai bagian dari rasa syukur penulis atas capaian sampai saat ini. Banyak jejak dan jasa orang lain baik disadari atau tidak yang membantu penulis dalam komunitas, karier, organisasi, aktivitas dalam civitas akademika dan masyarakat baik nasional maupun global.

# DAFTAR PUSTAKA

- Ağbulut, Ü. (2019). Turkey's electricity generation problem and nuclear energy policy. *Energy Sources Part A Recovery Utilization and Environmental Effects*, 41, 2281–2298. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1587107>
- Amir, S. (2010). Nuclear Revival in Post-Suharto Indonesia. *Asian Survey*, 50(2), 265–286. <https://doi.org/10.1525/as.2010.50.2.265>
- Archibald, M. M., & Gerber, N. (2018). Arts and Mixed Methods Research: An Innovative Methodological Merger. *American Behavioral Scientist*, 62(7), 956–977. <https://doi.org/10.1177/0002764218772672>
- Artisyuk V and M. Saito, 2006, COE-INES International Symposium INES-2 Nov. 26-30, 2006
- Atomic Energy Society of Japan, T. (Japan). (2005). *GLOBAL 2005: Proceedings of the international conference on nuclear energy systems for future generation and global sustainability*. GLOBAL 2005: International conference on nuclear energy systems for future generation and global sustainability, Japan.
- Badan Geologi. (2019). *Potensi Logam Tanah Jarang di Indonesia*. Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panas Bumi, Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral. Badan Geologi.
- Badan Tenaga Nuklir Nasional. (2003). *Energi nuklir sebagai bagian dari sistem energi nasional jangka panjang*.
- Bathke, C. G. et al., “Further Assessments of the Attractiveness of Materials in Advanced Nuclear Fuel Cycles from a Safeguards Perspective”, Proc. Of 10<sup>th</sup> Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Mito, Japan, (2008).
- Bathke, C. G. et al., “The Attractiveness of Materials in Advanced Nuclear Fuel Cycles For Various Proliferation and Theft Scenarios”, Proc. of Global 2009, Paris, France, (2009).
- BAPETEN. (2005). *ITB-TIT COE-INES Sympisium on Nuclear Energy in Indonesia*.

- Bell, S., & Morse, S. (2013). How People Use Rich Pictures to Help Them Think and Act. *Systemic Practice and Action Research*, 26(4), 331–348. <https://doi.org/10.1007/s11213-012-9236-x>
- Bernstein, L., Bosch, P., Canziani, O., Chen, Z., Christ, R., & Riahi, K. (2008). *IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report*. IPCC. [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/syr/en/contents.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html)
- Bezdek, R. H. (2021). Global Market for Radiation Applications. In E. Greenspan (Ed.), *Encyclopedia of Nuclear Energy* (pp. 588–597). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12336-X>
- Bhutada, G. (2022, August 24). *Who Is Building Nuclear Reactors?* Elements by Visual Capitalist. <https://elements.visualcapitalist.com/nuclear-reactors-under-construction/>
- Briesmeister, J. F. (2000). *MCNP—A General Monte Carlo NParticle Transport Code, Version 4C, LA-13709-M*. LANL.
- Brook, B. W., & Bradshaw, C. J. A. (2015). Key role for nuclear energy in global biodiversity conservation. *Conservation Biology*, 29(3), 702–712. <https://doi.org/10.1111/cobi.12433>
- Bruckner, T., Bashmakov, I. A., Mulugetta, Y., Chum, H., De la Vega Navarro, A., Edmonds, J., Faaij, A., Fungtammasan, B., Garg, A., Hertwich, E., Honnery, D., Infield, D., Kainuma, M., Khennas, S., Kim, S., Nimir, H. B., Riahi, K., Strachan, N., Wisner, R., & Zhang, X. (2014). Chapter 7—Energy systems. In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change IPCC*. Cambridge University Press. [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_chapter7.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_chapter7.pdf)
- Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC). (2016, May 30). *Small Modular Reactors: Regulatory Strategy, Approaches and Challenges*. <https://nuclearsafety.gc.ca/eng/acts-and-regulations/consultation/comment/d-16-04/index.cfm>
- Cao, J., Cohen, A., Hansen, J., Lester, R., Peterson, P., & Xu, H. (2016). China-U.S. cooperation to advance nuclear power. *Science*, 353(6299), 547–548. <https://doi.org/10.1126/science.aaf7131>
- Carbon dioxide emissions from power plants | The Siemens Stiftung Media Portal*. (2019). <https://medienportal.siemens-stiftung.org/en/carbon-dioxide-emissions-from-power-plants-102065>

- Conca, J. (2015). *EROI -- A Tool To Predict The Best Energy Mix*. Forbes. <https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2015/02/11/eroi-a-tool-to-predict-the-best-energy-mix/>
- Conte, K. P., & Davidson, S. (2020). Using a 'rich picture' to facilitate systems thinking in research coproduction. *Health Research Policy and Systems*, 18(1), 14. <https://doi.org/10.1186/s12961-019-0514-2>
- Davidson, A. J. (2022). *The role of nuclear energy in the global energy transition*. Oxford Institute for Energy Studies. <https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:28255df2-e24c-49da-a336-88dbdbdecca5>
- Departemen Energi dan Sumberdaya Mineral. (2005). *Blue print pengelolaan energi nasional 2005-2025*. Departemen Energi dan Sumberdaya Mineral.
- Economic Commission for Europe. (2022). *Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources*. United Nations.
- EnCore Energy Corp. (2022). *Nuclear Energy: The Future* | enCore Energy. <https://encoreuranium.com/industry-and-media/nuclear-energy-the-future/>
- Encyclopedia Britannica inc. (2022). *Nuclear Power*. <https://www.britannica.com/technology/nuclear-power>
- Energy Options Network. (2018). *What Will Advanced Nuclear Power Plants Cost?, A Standardized Cost Analysis Of Advanced Nuclear Technologies In Commercial Development*. <https://www.innovationreform.org/wp-content/uploads/2018/01/Advanced-Nuclear-Reactors-Cost-Study.pdf>
- GIF. (2021). *GIF Annual Report 2022*. GIF Portal. [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_216241/gif-annual-report-2022?details=true](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_216241/gif-annual-report-2022?details=true)
- Han, Z., Wickramaratne, C., Yogi Goswami, D., & Jotshi, C. (2022). Experimental study on operating characteristics of nitrate salt-based latent heat thermal energy storage unit. *Applied Thermal Engineering*, 202, 117846. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117846>
- Hariyanto, D. (2023). *Analisis Parameter Dalam Pengembangan Loop Garam Cair Sebagai Aparatus Uji Keselamatan Reaktor Nuklir* (Disertasi Program Doktor). Institut Teknologi Bandung.
- Hastowo, H. (2005). *Research Reactor in Indonesia*. Batan.

- Haubenreich, P. N., & Engel, J. R. (1970). Experience with the Molten-Salt Reactor Experiment. *Nuclear Applications and Technology*, 8(2), 118–136. <https://doi.org/10.13182/NT8-2-118>
- Hvistendahl, M. (2007). *Coal Ash Is More Radioactive Than Nuclear Waste*. Scientific American. <https://www.scientificamerican.com/article/coal-ash-is-more-radioactive-than-nuclear-waste/>
- IAEA. (1972). *IAEA Information Circular No: INFCIRC/153. (Corrected)*. International Atomic Energy Agency.
- IAEA. (2017). Opportunities for Cogeneration with Nuclear Energy. In *Opportunities for Cogeneration with Nuclear Energy* (pp. 1–91) [Text]. International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org/publications/10877/opportunities-for-cogeneration-with-nuclear-energy>
- IAEA. (2016, April 13). *Small modular reactors* [Text]. IAEA. <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>
- IEA. (2013). *World Energy Outlook 2013*. Organisation for Economic Co-operation and Development. [https://www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-outlook-2013\\_weo-2013-en](https://www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-outlook-2013_weo-2013-en)
- IEA. (2020). *Projected Costs Of Generating Electricity 2020 Edition*. International Energy Agency/Nuclear Energy Agency, Organisation For Economic Co-Operation And Development. <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>
- IEA. (2023). *Global Energy and Climate Model: Documentation – 2023*. International Energy Agency.
- IEA. (2022). *Innovative Nuclear Reactor Development: Opportunities for International Co-operation*. Nuclear Energy Agency (NEA). [https://oecd-nea.org/jcms/pl\\_35889/innovative-nuclear-reactor-development-opportunities-for-international-co-operation?details=true](https://oecd-nea.org/jcms/pl_35889/innovative-nuclear-reactor-development-opportunities-for-international-co-operation?details=true)
- Indrawan, R. (2021, September 24). *Hingga Juni 2021 Kapasitas Pembangkit Listrik Indonesia Mencapai 73.341 MW, Komposisi PLTU Mencapai 47%*. Dunia Energi. <https://www.dunia-energi.com/hingga-juni-2021-kapasitas-pembangkit-listrik-indonesia-mencapai-73-341-mw-komposisi-pltu-mencapai-47/>

- Infometrik. (2023). *Situs Informasi Mekanika, Material, dan Manufaktur*.  
Www.Infometrik.Com.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.). (2015). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report* (pp. 1–30). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415416.005>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Kai Putri, N. M., Js, B., & Aritionang, S. (2022). URANIUM AND THORIUM POTENTIAL FOR INDONESIA'S FUTURE ENERGY SECURITY. *International Journal of Education and Social Science Research*, 05(01), 235–251. <https://doi.org/10.37500/IJESSR.2022.5120>
- Kawata, T. (2005). *Executive Officer Japan Atomic Energy Agency (JAEA)*. Global 2005, Tsukuba, Japan.
- Kemenperin. (2020). *Kebutuhan Infrastruktur Listrik Yang Mendukung Kawasan Industri Prioritas, Direktorat Perwilayahan Industri*. Kementerian Perindustrian Republik Indonesia. [https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download\\_index/files/64707-kebutuhan-infrastruktur-listrik-untuk-kawasan-industri\\_edit.pdf](https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/64707-kebutuhan-infrastruktur-listrik-untuk-kawasan-industri_edit.pdf)
- KESDM. (2020). *Siaran Pers, Nomor: 062.Pers/04/Sji/2020, Tanggal: 7 Februari 2020, Kapasitas Pembangkit Naik Jadi 69,6 GW, Ebt Sumbang 10,3 GW*. Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/-kapasitas-pembangkit-naik-jadi-696-gw-ebt-sumbang-103-gw>
- Kessler, G. (2007). Plutonium denaturing by Pu-238. *Nuclear Engineering and Design*, 155, 53–73.
- Kupitz, J. (2000). *Small and Medium Reactors: Development Status and Application Aspects*. IAEA.
- Langdon, K. (2019). *NuScale Small Modular Reactor (SMR) Overview*.

- Lewis, D. (2008). Hydrogen and its relationship with nuclear energy. *Progress in Nuclear Energy*, 50(2), 394–401. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2007.11.072>
- Lindsey, R., & Dahlman, L. (2023). *Climate Change: Global Temperature* | NOAA *Climate.gov*. <http://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>
- Ludwig, S. B., & Croff, A. G. (2002). *ORIGEN-22, Isotope Generation and Depletion Code Matrix Exponential Method*.
- Mark, J. C., Hippel, F. V., & Lyman, E. (2009). Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium. *Science & Global Security*, 17(2–3), 170–185. <https://doi.org/10.1080/08929880903368690>
- Markandya, A., & Wilkinson, P. (2007). Electricity generation and health. *The Lancet*, 370(9591), 979–990. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(07\)61253-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(07)61253-7)
- Mekonnen, M. M., Pahlow, M., Aldaya, M. M., Zarate, E., & Hoekstra, A. Y. (2015). Sustainability, Efficiency and Equitability of Water Consumption and Pollution in Latin America and the Caribbean. *Sustainability*, 7(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/su7022086>
- MEMR. (2020). *Electricity Supply during the Covid-19 Pandemic Stands by 5 Principles*. Ministry of Energy and Mineral Resources.
- MEMR. (2021). Indonesia's electricity roadmap under 2050 net zero carbon (TWh) by each technology type. In *MEMR's Power and Utility Strategies to Achieve Indonesia's Carbon Neutral by 2050 (draft 16 April 2021)*. Ministry of Energy and Mineral Resources.
- Miftahsani, F. (2021). *Studi desain dan analisis neutronik serta termal hidrolis pada high-temperature gas-cooled reactor (HTGR) dengan menggunakan lapisan ZrC pada bahan bakar berlapis* (Disertasi Program Doktor). Institut Teknologi Bandung.
- NEI. (2022). *Quick Facts on Nuclear Industry Jobs*. <https://www.nei.org/advantages/jobs>
- Oludare, A. (2018). *Comparative Analysis of nuclear power generation and other power generation sources together with other social-economic development sectors in terms of accidents frequency and magnitude*.



- Omoto, A. (2007). *IAEA Activities In Support of Rising Expectation For The Role Of Nuclear Power and Its Non- Electric Applications.*
- Pane, J. S. (2021). *Experiences On Operation and Utilization of TRIGA 2000.* ORTN - Badan Riset dan Inovasi Nasional.
- Pellaud, B. (2002). Proliferation aspects of plutonium recycling. *Comptes Rendus Physique*, 3(7), 1067–1079. [https://doi.org/10.1016/S1631-0705\(02\)01364-6](https://doi.org/10.1016/S1631-0705(02)01364-6)
- Pemerintah Indonesia. (2014). *Government Regulation No. 79/2014 National Energy Policy.* Pemerintah Indonesia. <http://jdih.esdm.go.id/peraturan/PP%20No.%2079%20Thn%202014.pdf>
- Pemerintah Indonesia. (2017). *Presidential Regulation No. 22/2017 General Planning for National Energy.* Pemerintah Indonesia. <http://jdih.esdm.go.id/peraturan/Perpres%2022%20Tahun%202017.pdf>
- Permana, S. (2012). *Research and Development of Nuclear Science and Technology in Preparing the Nuclear Industry in Indonesia.*
- Permana, S., & Suzuki, M. (2011). Basic evaluation on material attractiveness of isotopic plutonium barrier. *Progress in Nuclear Energy*, 53(7), 958–963. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2011.04.014>
- Permana, S., Suzuki, M., & Saito, M. (2011). Basic Analysis on Isotopic Barrier of Material Attractiveness Based on Plutonium Composition of FBR. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 48(5), 724–733. <https://doi.org/10.1080/18811248.2011.9711755>
- Permana, S., Trianti, N., & Rahmansyah, A. (2021). Nuclear energy contribution potential to secure electricity demand with low carbon emission and low risk of power plant in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 753(1), 012048. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/753/1/012048>
- Permana, S., Trianti, N., & Rahmansyah, A. (2022). Nuclear Energy Contribution for Net Zero Emission and National Energy Mix 2060 in Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 2243(1), 012066. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2243/1/012066>
- PLN. (2021). *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021-2030.* PLN.
- PLN. (2022a). *Statistik PLN 2022.*

- PLN. (2022b). *PLN's move from diesel will lead to net-zero carbon emissions*. The Jakarta Post. <https://www.thejakartapost.com/adv/2022/03/24/plns-move-from-diesel-will-lead-to-net-zero-carbon-emissions.html>
- President's meeting of G8 countries, Brazil, China, India and South Africa. (2006). *Presented paper of Contribution of Coal and Nuclear to Sustainable Energy Supply: Perspectives and Problems*.
- Reforminer. (2021). *Kebijakan Net Zero Emission dan Ketahanan Energi Nasional*. <https://reforminer.com/wp-content/uploads/2022/10/2-1.png>
- Reyes, J. N., & Hopkins, J. (2018). *A Promising Innovation in Nuclear Energy*. The 7th Round-Table for Studying Energy Situations, Next-Generation Technologies and Innovation for Decarbonization.
- Ritchie, H., & Roser, M. (2020a). Sector by sector: Where do global greenhouse gas emissions come from? *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>
- Ritchie, H., & Roser, M. (2020b). What are the safest and cleanest sources of energy? *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy>
- Ritchie, H., & Roser, M. (2022). How does the land use of different electricity sources compare? *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/land-use-per-energy-source>
- Rully R. Ramli & Bambang P. Jatmiko. (2020, August 19). *Paruh Pertama 2020, Kapasitas Pembangkit Listrik EBT Capai 10,4 GW*. <https://money.kompas.com/read/2020/08/19/170000626/paruh-pertama-2020-kapasitas-pembangkit-listrik-ebt-capai-10-4-gw>
- Saito, M. (2002). Multi-Component Self-Consistent Nuclear Energy System for sustainable growth. *Progress in Nuclear Energy*, 40(3), 365–374. [https://doi.org/10.1016/S0149-1970\(02\)00030-6](https://doi.org/10.1016/S0149-1970(02)00030-6)
- Saito, M., Artisyuk, V., Takibayev, A., Ismailov, K., & Sagara, H. (2008). Development of methodology for plutonium categorization (II) - Improvement of evaluation function “attractiveness”-: 2008 Annual Meeting on American Nuclear Society. *Transactions of the American Nuclear Society*, 98, 669. <http://www.scopus.com/inward/record.url?scp=55249102890&partnerID=8YFLogxK>

- Sasakawa Peace Foundation USA. (2015). *The United states and the future of Nuclear energy*. [https://www.jaif.or.jp/cms\\_admin/wp-content/uploads/2015/04/JAIF48th\\_Admiral-Dennis-C.-Blair\\_fix.pdf](https://www.jaif.or.jp/cms_admin/wp-content/uploads/2015/04/JAIF48th_Admiral-Dennis-C.-Blair_fix.pdf)
- Sekimoto, H. (2002). *Catatan Kuliah Nuclear Engineering*. Tokyo Institute of Technology.
- Setiawan, Y., Verda Nano. (2021, September 20). *Kebutuhan Listrik Capai 1885 Twh pada 2060, Bakal Dipasok dari EBT - Energi Baru Katadata.co.id*. <https://katadata.co.id/yuliawati/ekonomi-hijau/61482b779188f/kebutuhan-listrik-capai-1885-twh-pada-2060-bakal-dipasok-dari-ebt>
- Shibata, K., Kawano, T., Nakagawa, T., Iwamoto, O., Katakura, J., Fukahori, T., Chiba, S., Hasegawa, A., Murata, T., Matsunobu, H., Ohsawa, T., Nakajima, Y., Yoshida, T., Zukeran, A., Kawai, M., Baba, M., Ishikawa, M., Asami, T., Watanabe, T., ... Takano, H. (2002). Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-3: JENDL-3.3. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 39(11), 1125–1136. <https://doi.org/10.1080/18811248.2002.9715303>
- Statista. (2021). *Capacity factors for selected energy sources in the United States in 2021*. Statista. <https://www.statista.com/statistics/183680/us-average-capacity-factors-by-selected-energy-source-since-1998/>
- Strangeways, A., & Papatraianou, L. (2019). Remapping the Landscape of Resilience: Learning from an Arrernte Teacher's Story. *Journal of Intercultural Studies*, 40(1), 16–31. <https://doi.org/10.1080/07256868.2018.1552569>
- Subki, M. H. (2018). *IAEA Project 1.1.5.2 on SMR Technology Development and Update of Global SMR Development*. First Meeting of TWG-SMR, IAEA Headquarters, Vienna International Centre, M5, 23 – 26 April 2018, Vienna, Austria.
- Supapo, K. R. M., Lozano, L., Tabañag, I. D. F., & Querikiol, E. M. (2021). A Geospatial Approach to Energy Planning in Aid of Just Energy Transition in Small Island Communities in the Philippines. *Applied Sciences*, 11(24), Article 24. <https://doi.org/10.3390/app112411955>
- Syaeful, H., Sukadana, I. G., Susilo, Y. S. B., Indrastomo, F. D., Muhammad, A. G., & Ngadenin. (2021). Uranium Exploration, Deposit and Resources: The Key of Nuclear Power Plant Development Program in Indonesia.

*Journal of Physics: Conference Series*, 2048(1), 012003.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2048/1/012003>

Thoughtscapism. (2017, November 27). Nuclear Energy Is the Fastest and Lowest-Cost Clean Energy Solution. *Thoughtscapism*.  
<https://thoughtscapism.com/2017/11/27/nuclear-energy-is-the-fastest-and-lowest-cost-clean-energy-solution/>

Umah, A. (2021). *RI Perkiraan Bangun Pembangkit Nuklir Pasca 2035*. CNBC Indonesia. <https://www.cnbcindonesia.com/news/20210723183843-4-263207/ri-perkiraan-bangun-pembangkit-nuklir-pasca-2035>

*Undang-undang Republik Indonesia No. 10 Tahun 1997 tentang Ketenaga Nukliran*. (1997).

US DOE. (2020a). *Could Hydrogen Open New Markets for Nuclear?* Energy.Gov. <https://www.energy.gov/ne/articles/could-hydrogen-open-new-markets-nuclear>

US DOE. (2020b). *Infographic: Nuclear is Clean Power & Clean Air - 2019*. Energy.Gov. <https://www.energy.gov/ne/articles/infographic-nuclear-clean-power-clean-air-2019>

US DOE. (2021a). *3 Reasons Why Nuclear is Clean and Sustainable*. Energy.Gov. <https://www.energy.gov/ne/articles/3-reasons-why-nuclear-clean-and-sustainable>

US DOE. (2021b). *INFOGRAPHIC: How Much Power Does A Nuclear Reactor Produce?* Energy.Gov. <https://www.energy.gov/ne/articles/infographic-how-much-power-does-nuclear-reactor-produce>

US DOE. (2022). *Hydrogen Production*. Energy.Gov. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production>

US EIA. (2015). *US EIA monthly capacity factors for renewables 2011-2013*. [https://en.wikipedia.org/wiki/File:US\\_EIA\\_monthly\\_capacity\\_factors\\_2011-2013.png](https://en.wikipedia.org/wiki/File:US_EIA_monthly_capacity_factors_2011-2013.png)

Weißbach, D., Ruprecht, G., Huke, A., Czernski, K., Gottlieb, S., & Hussein, A. (2013). Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants. *Energy*, 52, 210–221. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.029>

West, J. M., & Davis, W. K. (2001). The creation and beyond: Evolutions in US nuclear power development. *Nuclear News*, 44(7), 30–43.

- whitehouse.gov. (2009, April 5). *Remarks By President Barack Obama In Prague As Delivered*. Whitehouse.Gov. <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/remarks-president-barack-obama-prague-delivered>
- Widiawati, N. (2021). *Studi desain dan analisis reaktor cepat berpendingin 208Pb-Bi eutektik dengan skema Burnup MCANDLE radial* (Disertasi Program Doktor). Institut Teknologi Bandung.
- Wikimedia. (2017). *World population percentage*. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:World\\_population\\_percentage.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:World_population_percentage.png)
- Wikipedia. (2016). Badan Tenaga Nuklir Nasional. In *Wikipedia bahasa Indonesia, ensiklopedia bebas*. [https://id.wikipedia.org/w/index.php?title=Badan\\_Tenaga\\_Nuklir\\_Nasional&oldid=24501395](https://id.wikipedia.org/w/index.php?title=Badan_Tenaga_Nuklir_Nasional&oldid=24501395)
- Wikipedia. (2022). *Nuclear power in Indonesia*. Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Nuclear\\_power\\_in\\_Indonesia&oldid=1177383770](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Nuclear_power_in_Indonesia&oldid=1177383770)
- World Nuclear Association. (2011). *Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources*.
- World Nuclear Association. (2021). *Nuclear Process Heat*. <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/industry/nuclear-process-heat-for-industry.aspx>
- World Nuclear Association. (2022a). *Nuclear Energy and Sustainable Development*. <https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/nuclear-energy-and-sustainable-development.aspx>
- World Nuclear Association. (2022b). *Nuclear Power in the World Today*. <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>
- Wulandari, C., Waris, A., Permana, S., & Pramuditya, S. (2022). Evaluating the JEFF 3.1, ENDF/B-VII.0, JENDL 3.3, and JENDL 4.0 nuclear data libraries for a small 100 MWe molten salt reactor with plutonium fuel. *Nuclear Science and Techniques*, 33(12), 165. <https://doi.org/10.1007/s41365-022-01141-8>
- Zhang, S., Li, Z., Wang, H., Tian, L., Jin, Y., Alston, M., & Yan, Y. (2022). Component-dependent thermal properties of molten salt eutectics for

solar thermal energy storage: Experiments, molecular simulation and applications. *Applied Thermal Engineering*, 209, 118333. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118333>

# PROFIL PENULIS



Nama : Prof. Dr.Eng. Ir. Sidik Permana, MBA  
Tempat/tgl lahir : Bandung/ 11 Mei 1978  
Kel. Keahlian : Fisika Nuklir dan Biofisika  
Alamat Kantor : Jl. Ganesha No. 10 Gedung Fisika  
Nama Istri : Nilam Bekti Sumardhani, M.Eng  
Nama Anak : Rasyid Abdurrahman, Raisya Salma  
Tsabita, Rei Fathan Syahidan

## I. RIWAYAT PENDIDIKAN

Sekolah Dasar (SD) : SDN Cijerokaso 1 Lulus 1990  
Sekolah Menengah Pertama (SMP) : SMPN 29 Bandung, Lulus 1993  
Sekolah Menengah Atas (SMA) : SMAN 6 Bandung, Lulus 1996  
Sarjana : Fisika ITB, Lulus 2001  
Magister : Nuclear Engineering, Tokyo Institute of Technology, Lulus 2004  
Magister : Energy Management MBA (ENEMBA), SBM, ITB, Lulus 2023  
Doktor : Tokyo Institute of Technology, Lulus 2007  
Profesional Insinyur : Program Profesional Insinyur (PPI) ITB, Lulus 2021

## II. RIWAYAT KERJA DI ITB

2011 – sekarang : Ketua/Panitia seminar internasional : APS, ICMNS, ICANSE, ICENES, ICCSE, ICES, IAEA Reg.Meeting,  
2012 – sekarang : Ketua/Panitia seminar nasional : Seminar Kontribusi Fisika (SKF), SNIPS, SKN, IFAR  
2012 - 2015 : Panitia ON-MIPA, PKM LK, Satgas Asrama ITB, Koord. Asrama Internasional, Narasumber SSDK LTPB  
2013 - 2014 : Wakil Ketua Laboratorium Fisika Dasar  
2014 – 2016 : Wakil Ketua UPT Asrama ITB

- 2018 - 2020 : Ketua Bidang Pelatihan UPT Pengembangan Manusia dan Organisasi (PMO)
- 2020 – 2021 : Chief Editor Jurnal Matematika dan Sains (JMS)
- 2021 – 2022 : Kaprodi Magister Pengajaran Fisika
- 2021 – 2022 : Kaprodi Magister Ilmu dan Rekayasa Nuklir
- 2021 - 2022 : Kaprodi Doktor Rekayasa Nuklir
- 2023 - 2028 : Ketua Kelompok Kehalian Fisika Nuklir dan Biofisika (KK FNB)

### III. RIWAYAT KEPANGKATAN

- Pembina Tk.I- IVb : 1 Oktober 2023, SK 62572/B/07/2023
- Pembina – IVa : 1 April 2020, SK 48149/A3/KP/2020
- Penata Tk.I-IIIId : 1 April 2018
- Penata- IIIc : 1 Oktober 2008, SK 37087/A4/KP/2009

### IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

- Guru Besar (Profesor) : 1 April 2023, No. SK 25404/M/07/2023
- Lektor Kepala : 1 September 2017, No. SK 98789/A2.3/KP/2017
- Lektor : 1 Desember 2008

### V. KEGIATAN PENELITIAN

No	Tahun	Judul Penelitian	Sumber Pendanaan
1	2024	Evaluasi Pemetaan dan Monitoring Lingkungan Berbasis pada Radiasi Nuklir Alam Dan Cuaca Di Indonesia	Penelitian Desentralisasi (PDUPT) Kemendikbud-ristek
2	2023	Studi Parameter Dalam Pengembangan Loop Sirkulasi Alami Garam Cair Sebagai Aparatus Uji Keselamatan Reaktor Nuklir Garam Cair	Penelitian Kompetitif Nasional ( PPS-PDD ) Kemendikbud-ristek
3	2023	Desain Dasar Perancangan Reaktor Nuklir Berbasis Small Modular Reactor (SMR) dan Very Small Modular Reactor (VSMR) Untuk Mendukung Program Net Zero Emission (NZE) di Indonesia	Penelitian Kompetitif Nasional ( PPS-PTM ) Kemendikbud-ristek
4	2023	Desain Dan Evaluasi Reaktor Nuklir Generasi Ke-4 Berbasis Molten Salt Reactor : Simulasi Dan Eksperimen Loop Garam Cair (Molten Salt)Desain Dan Evaluasi Reaktor Nuklir Generasi Ke-4 Berbasis Molten Salt Reactor : Simulasi Dan Eksperimen Loop Garam Cair	RISET ITB ( RISET ITB 2023 )



No	Tahun	Judul Penelitian	Sumber Pendanaan
5	2023	Desain Dan Evaluasi Reaktor Nuklir Generasi Ke-4 Berbasis Molten Salt Reactor : Simulasi Dan Eksperiment Loop Garam Cair (Molten Salt)	RISET ITB 2023 ( RISET ITB 2023 )
6	2023	Analisis Termal-Hidrolik Molten Salt Reactor 100 Mwe Berbahan Bakar Th-Pu-Ma Dengan Jenis Garam Cair Flinak Dan Fnabe Menggunakan Code Openfoam	RISET ITB 2023 ( RISET ITB 2023 )
7	2023	Evaluasi Pemetaan dan Monitoring Lingkungan Berbasis pada Radiasi Nuklir Alam Dan Cuaca Di Indonesia	Penelitian Desentralisasi (PDUPT) Kemendikbud-ristek
8	2022	Evaluasi Keselamatan dan Rancang Bangun Pengoperasioan Molten Salt Loop Suhu Tinggi Sebagai Dasar Pengembangan Teknologi Molten Salt Reactor	Riset International Program Staf Exchange dan Research Grant ITB
9	2022	Evaluasi Pemetaan dan Monitoring Lingkungan Berbasis pada Radiasi Nuklir Alam Dan Cuaca Di Indonesia	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi (PDUPT)
10	2021	Pengembangan Reaktor Nuklir Generasi ke-4 Berbahan Bakar Thorium Bagian 2: Potensi dan Analisis Daur Ulang Bahan Bakar, dan Komparatif Desain Dasar	Program Riset Inovasi ITB
11	2021	Studi pemetaan potensi bahan mineral radioaktif sebagai sumber bahan bakar nuklir uranium dan thorium di Indonesia	P PMI Multi KK FMIPA ITB
12	2021	Rancang Bangun Dan Analisis Sirkulasi Alamiah Garam Cair Reaktor Nuklir Generasi Ke-IV)	Penelitian Kompetitif Nasional (PPS-PDD)
13	2021	Potensi Dan Perencanaan Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) Berbahan Bakar Thorium (PLTT) Di Indonesia )	Program Riset Desentralisasi DIKTI, PTUPT
14	2020	Desain Reaktor Nuklir Inovatif Berbahan Bakar dan Pendingin Garam Cair Dan Logam Cair Suhu Tinggi	World Class University (WCU) DIKTI
15	2020	Pemanfaatan Bahan Bakar Nuklir Berbasis Thorium Untuk Industri Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) Di Indonesia.	Program Riset Desentralisasi DIKTI, PTUPT

No	Tahun	Judul Penelitian	Sumber Pendanaan
16	2020	Analisis, monitoring dan pemetaan radiasi alam dan pengembangan peralatan portable yang secara real time bisa memonitor, termasuk cuaca	Program Riset Desentralisasi DIKTI, PTUPT
17	2020	Studi Desain Netronik dan Keselamatan Reaktor Maju Generasi ke-4 Berdaya Kecil Berumur Panjang.	Penelitian Kompetitif Nasional (PPS-PDD)
18	2020	Penelitian P3MI KK Fisika Nuklir dan Biofisika. Kegiatan penelitian, inovasi dan pengabdian masyarakat kelompok keahlian di ITB.	P3MI KK ITB
19	2020	Pengembangan Reaktor Nuklir Generasi ke-4 Berbahan Bakar Thorium : Desain Dasar, Aspek Keselamatan dan Non-proliferasi Nuklir	Program Riset Inovasi ITB
20	2019	Pemanfaatan Bahan Bakar Nuklir Berbasis Thorium Untuk Industri Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) Di Indonesia	Program Riset Desentralisasi DIKTI, PUPT
21	2019	Pemetaan Dan Monitoring Lingkungan Radiasi Nuklir Alam Dalam Menunjang Evaluasi Tapak PLTN	Program Riset Desentralisasi DIKTI, PUPT
22	2019	Penelitian P3MI KK Fisika Nuklir dan Biofisika	P3MI KK ITB
23	2017/2018	Study on Transuranium Fuel Loading Effect to Fuel Breeding Capability and Nuclear Nonproliferation Aspect of Plutonium in Fast Breeder Reactor (FBR)	2017 Overseas Research Grants, Asahi Glass Foundation
24	2018	Pemanfaatan Bahan Bakar Nuklir Berbasis Thorium Untuk Industri Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) Di Indonesia	Program Riset Desentralisasi DIKTI, PUPT
25	2018	Pemetaan Dan Monitoring Lingkungan Radiasi Nuklir Alam Dalam Menunjang Evaluasi Tapak PLTN	Program Riset Desentralisasi DIKTI, PUPT
26	2018	Penelitian P3MI KK Fisika Nuklir dan Biofisika	P3MI KK ITB
27	2017	Pengaruh Perbedaan Daur Ulang Bahan Bakar Nuklir Terhadap Fuel Breeding dan Produksi Plutonium pada Reaktor Nuklir Pembiak Cepat	Program Riset Inovasi ITB

No	Tahun	Judul Penelitian	Sumber Pendanaan
28	2016/2017	Analysis on Uranium and Thorium Fuel Cycle Utilizations In Term of Fuel Sustainability in Nuclear Power Plant (NPP)	Osaka Gas Foundation 2016
29	2016/2017	Analysis on Burnup and Cooling Time Effect of Nuclear Non-proliferation Aspect for Plutonium Production in Nuclear Power Plant (NPP)	2016 Overseas Research Grants, Asahi Glass Foundation
30	2016	Analisis konversi bahan bakar nuklir dan faktor keselamatan PLTN tipe reaktor termal dan reaktor cepat dengan bahan bakar nuklir thorium (Tahun Pertama)	Program Riset Desentralisasi DIKTI, PUPT
31	2016	Analisis Sustainability Bahan Bakar Nuklir dan Aspek Nuklir Non Proliferation Dengan Bahan Bakar Uranium dan Thorium Pada Pembangkit Listrik Tenaga (Tahun Kedua)	Program Riset Desentralisasi DIKTI, PUPT
32	2015	Analisis Pengaruh Burnup dan Waktu Pendinginan Terhadap Fuel Breeding dan Material Barrier pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)	Program Riset Inovasi ITB
33	2015	Analisis Sustainability Bahan Bakar Nuklir dan Aspek Nuklir Non-Proliferation Dengan Bahan Bakar Uranium dan Thorium Pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)	Program Riset Desentralisasi DIKTI, PUPT
34	2015/2016	Analysis on Burnup and Cooling Time Effect of Nuclear Non-proliferation Aspect for Plutonium Production in Nuclear Power Plant (NPP)	2015 Overseas Research Grants, Asahi Glass Foundation
45	2014	Effect of Even Mass Plutonium Production on Fuel Breeding and Material Barrier of Plutonium In Nuclear Power Plant, 2014	Program Riset Inovasi ITB
46	2014	Studi Disain dan Optimasi PLTN Generasi IV Berpendingin Gas Moduler Untuk Cogenerasi Produksi Listrik, Produksi Gas Hidrogen dan Enhanced Oil Recovery, Tahap II, 2014	Program Riset Inovasi ITB
37	2014	Pengembangan dan Aplikasi Konsep Material Attractiveness Proliferasi Intrinsik Produksi Plutonium pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), Second year, 2014	Program Insentif Riset SINAS RISTEK

No	Tahun	Judul Penelitian	Sumber Pendanaan
38	2013	Evaluasi Produksi Inventori Plutonium dan Faktor Nuklir Non-Proliferasi Intrinsik Plutonium pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), 2013	Program Riset Inovasi ITB
39	2013	Studi Disain dan Optimasi PLTN Generasi IV Berpendingin Gas Moduler Untuk Cogenerasi Produksi Listrik, Produksi Gas Hidrogen dan Enhanced Oil Recovery. 2013	Program Riset Inovasi ITB
40	2013	Pengembangan dan Aplikasi Konsep Material Attractiveness Proliferasi Intrinsik Produksi Plutonium pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), 2013,	Program Insentif Riset SINAS RISTEK
41	2012	Analisis Dasar Penerapan Konsep Material Attractiveness Untuk Mengevaluasi Level Proliferasi Intrinsik Pada Reaktor Jenis Thermal dan Pembiak Cepat,	Program Riset Inovasi ITB
42	2012	Analisis Keselamatan Pada Sistem Transfer Kalor Pada Teras Reaktor Nuklir Menggunakan Prinsip Sirkulasi Alami	Program Riset Inovasi ITB
43	2009-2012	Study About Plutonium Isotope Effect on Nuclear Proliferation Resistance	Japan Atomic Energy Agency (JAEA) Postdoctoral Fellow Research

## VI. PUBLIKASI

No	Judul Artikel Ilmiah	Nama Jurnal	Volum/ Nomor/Tahun
1	Comparative Analysis on Small Modular Reactor (SMR) with Uranium and Thorium Fuel Cycle	Nuclear Engineering and Design	Accepted, In Publishing Process /2024
2	Design and validation of a single cylindrical neutron spectrometer using a gold activation foil	Radiation Measurements	2024/1/6
3	Irregular pentagon loop for nuclear reactor natural circulation system test apparatus	Nuclear Engineering and Design	416, 112753/2024
4	Effect Of Gamma Co-60 Irradiation On Morphology Of Carbon/Sodium Lauryl Sulphate (Carbon/SLS) Using A Novel SEM-EDS	Malaysian Journal of Microscopy	19 (2), 15-23/2023

No	Judul Artikel Ilmiah	Nama Jurnal	Volum/ Nomor/Tahun
5	Neutronic performance evaluation of Plutonium Recycling in two core sizes for a 250 MWt Molten salt reactor	Nuclear Engineering and Design	415, 112733/2023
6	Development of single moderator-based neutron spectrometer for neutron spectrometry in reactor core	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	2023/12/1 Vol 1057 / 168794
7	Neutronic design performance of 100 MWe MSR with thorium-enriched uranium and thorium-plutonium-minor actinide fuel	Nuclear Engineering and Design	414, 112646/2023
8	Comparison of thermal-hydraulic calculation in 100 MWt thorium-based HTGR using SiC and ZrC TRISO coated fuel particle	Nuclear Engineering and Design	412, 112463/2023
9	Nitrate salt phase transition study for molten salt loop working fluid consideration	Heat and Mass Transfer, 1-16	2023/9/14 Hal 1-16
10	Evaluation on Structure, System, and Component Qualification in the Periodic Safety Review of RSG-GAS	Advances in Science and Technology	2023/4/14 Vol 126
11	Comparison of Melted Corium Relocation during Severe Accident of High Temperature Reactor using Moving Particle Semi-Implicit Method	Computational And Experimental Research In Materials And Renewable Energy	2023/5/31 Vol 6/1/1-13
12	Optimization of 200 MWt HTGR with ThUN-based fuel and zirconium carbide TRISO layer	Kerntechnik	2023/5/9
13	Evaluating the JEFF 3.1, ENDF/B-VII. 0, JENDL 3.3, and JENDL 4.0 nuclear data libraries for a small 100 MWe molten salt reactor with plutonium fuel	Nuclear Science and Techniques	2022/12 Vol 33 (12) hal 165
14	Dynamic analysis of TMSR-500 reactor core	AIP Conference Proceedings	2501 (1), 040012/2022
15	Neutron Beam Characterization on the Beam Tubes of 30 MW GA Siwabessy Reactor Using Monte Carlo	Journal of Physics: Conference Series	2328 (1), 012001/2022
16	Simulation of Neutron and Gamma Dose Rate of The TRIGA 2000 Reactor Using Monte Carlo Method	Journal of Physics: Conference Series	2328 (1), 012007, 2022

No	Judul Artikel Ilmiah	Nama Jurnal	Volum/ Nomor/Tahun
17	Simulation of Erosion Behavior of a Paraffin Plate with Particle Method	Journal of Physics: Conference Series	2328 (1), 012006, 2022
18	Design study of 208Pb-Bi eutectic-cooled reactor with natural uranium as fuel cycle input with radial fuel shuffling	Annals of Nuclear Energy	171, 109003, 2022
19	Filtration efficiency analysis of cotton cloth-based mask for reducing transmission rate of COVID-19 using PM2.5 detection methods	Journal of Physics: Conference Series	2243 (1), 012067, 2022
20	Nuclear Energy Contribution for Net Zero Emission and National Energy Mix 2060 in Indonesia	Journal of Physics: Conference Series	2243 (1), 012066, 2022,
21	Mass Inventory Balance and Fuel Breeding Analysis on Transuranic Recycling Option of FBR	Nuclear Science and Engineering	
22	Comparison of neutronic aspects in high-temperature gas-cooled reactor using ZrC and SiC Triso particle with 50 and 100 MWt power	International Journal of Energy Research	46 (4), 4852-4868, 2022
23	Basic analysis on heat transfer phenomena in natural circulation for liquid sodium	Journal of Physics: Conference Series	2072 (1), 012012, 2021,
24	Simulation on the Effect of Temperature Inlet and MassFlowrate Variations to the Temperature Distribution in Single Pelet Thermal Reactor Core Title	Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)	11 (1), 2021
25	Initial core design analysis of lead (208)-bismuth eutectic-cooled reactor with radial fuel shuffling	International Journal of Energy Research	45 (8), 12317-12324, 2021
26	Experimental and simulation approach of the loop geometry effect on the natural circulation system of the advanced nuclear reactor	International Journal of Energy Research	45 (8), 11892-11903, 2021
27	Experimental Study of Thermal Behavior of a Singlephase Natural Circulation Loop with Vertical Heater and Cooler	Journal of Physics: Conference Series	1949 (1), 012024, 2021
28	Simulation of microtube irradiation on the beam tubes of GA Siwabessy reactor for in-vitro boron neutron capture therapy	Journal of Physics: Conference Series	1949 (1), 012017, 2021
29	Neutronic Performances of 100 MWe MSR with Weapon Grade Plutonium Fuel	Journal of Physics: Conference Series	1949 (1), 012019, 2021,

No	Judul Artikel Ilmiah	Nama Jurnal	Volum/ Nomor/Tahun
30	Studi Pengaruh Perbedaan Ketebalan Freeze-Valve Di MSR (Molten Salt Reactor) Dalam Pengendalian Kecelakaan	GANENDRA Majalah IPTEK Nuklir	2021, 24 (1), 29-40
31	Nuclear energy contribution potential to secure electricity demand with low carbon emission and low risk of power plant in Indonesia	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	753 (1), 012048, 2021,
32	Geometry aspect review of the natural circulation system as innovation in passive cooling of nuclear reactor	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	753 (1), 012015, 2021,
33	Analisis Ukuran Teras dan Rasio H/D pada Molten Salt Fast Reactor dalam Tinjauan Neutronik	Jurnal Fisika Unand	10 (1), 34-40, 2021,
34	Characterization of neutron and gamma beams at the tangential beam port of TRIGA 2000 reactor using Monte Carlo methods	Journal of Physics: Conference Series	1772 (1), 012024, 2021,
35	Natural Uranium Utilization in FUJI-U3 Molten Salt Reactor	Journal of Physics: Conference Series	1772 (1), 012023, 2021,
36	Natural Uranium Utilization in FUJI-U3 Molten Salt Reactor	Journal of Physics: Conference Series	1772 (1), 012023, 2021,
37	Comparatives Studies in Molten Salt Reactor FUJI-U3 with Various Power	Journal of Physics: Conference Series	1772 (1), 012027, 2021,
38	Study on control rod reactivity of small pebble bed reactor with wallpaper fuel design	Journal of Physics: Conference Series	1772 (1), 012021, 2021,
39	Enhancing the performance of a long-life modified CANDLE fast reactor by using an enriched 208Pb as coolant	Nuclear Engineering and Technology	53 (2), 423-429, 2021,
40	Study of effect of differences freeze-valve thickness in MSR (Molten Salt Reactor) in accident control	Jurnal Iptek Nuklir Ganendra 24 (1), 29-40	24 (1), 29-40, 2021,
41	Analysis on different material attractiveness concept based on plutonium composition of FBR blanket system	Progress in Nuclear Energy,	2020, 127, 103404
42	Basic design analysis of a heavy water-cooled thorium breeder reactor	Nuclear Engineering and Design,	2020, 364, 110689

No	Judul Artikel Ilmiah	Nama Jurnal	Volum/ Nomor/Tahun
43	Comparatives Studies of A Safety Analysis for Molten Salt Reactor (MSR)	Journal of Physics: Conference Series,	2020, 1493(1), 012 030
44	Design Conceptual of 800MWt Long Life Pressurized Water Reactor Using (Th-U)O <sub>2</sub> Fuels with Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> and Pa-231 as Burnable Poisons	Journal of Physics: Conference Series,	2020, 1493(1), 012006
45	Comparison of Irradiation Effect of ThO <sub>2</sub> and ThZrH on Neutronic Parameter of the TRIGA 2000 Reactor	Journal of Physics: Conference Series,	2020, 1493(1), 012017
46	A Comparative Study of Th-U <sup>233</sup> and Th-Pu Molten-Salt Reactor (MSR) with 2-region core	Journal of Physics: Conference Series,	2020, 1493(1), 012015
47	Assessment of Gamma and Neutron Dose of Optimizing the Radiation Protection in TRIGA 2000 BATAN Bandung.	Journal of Physics: Conference Series,	2020, 1493(1), 012011
48	Neutronic Analysis of Lead208-Bismuth EutecticCooled Modified CANDLE Reactor with Core Geometry Variations	Journal of Physics: Conference Series,	2020,1493(1), 012010
49	Basic design parameter optimization on water cooled thorium breeder reactor	Annals of Nuclear Energy,	2020, 139, 107218
50	Experimental and simulation approach of the loop geometry effect on the natural circulation system of the advanced nuclear reactor	International Journal of Energy Research,	September 2020
51	Enhancing the performance of a long-life modified CANDLE fast reactor by using an enriched 208Pb as coolant	Nuclear Engineering and Technology	6 August 2020
52	Experimental investigation of natural circulation in a single-phase loop with different widths,	Int. J Electron Electr Electron Eng	8 (2), 24-30, 2020
53	D Hariyanto, N Yuningsih, S Permana, Neutronic Analysis of Small Long-Life Pressurized Water Reactor Using (Th-U) O <sub>2</sub> Fuels with Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> and Pa <sub>231</sub> as Burnable Poisons,	Indonesian Journal of Physics	31(1), 2020
54	D Hariyanto, S Permana, Three-dimensional (XYZ) Core Design of Long-Life Pressurized Water Reactor Using (Th-U) O <sub>2</sub> Fuels with The Addition of Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> and Pa-231 as Burnable Poisons,	Indonesian Journal of Physics	31(1), 2020
55	Plutonium and Minor Actinide Utilization in Fuji-U1 Molten Salat Reactor	Journal of Physics: Conference Series	1204 (1), 012132,



No	Judul Artikel Ilmiah	Nama Jurnal	Volum/ Nomor/Tahun
			2019
56	Plenary Design Study of Small Power 30-50 MWt Experiment Power Reactor based on High Temperature Pebble Bed Gas Cooled Reactor Technology,	Journal of Physics: Conference Series	1127 (1), 012024, 2019
57	Comparative Analysis on Fuel Breeding for Less Moderation Ratio of Water Cooled Reactor,	Journal of Physics: Conference Series	1204[[1], 012129, 2019
58	Fuel Breeding Analysis On Low Moderated Fuel Ratio Based On Actinides Closed Water-Cooled Thorium Reactor,	Journal of Physics: Conference Series	1090 (1), 012061, 2018
59	Comparative Evaluation on Several Reactor Type of Actinide Closed-Cycle Schemes,	Journal of Physics: Conference Series	1090 (1), 012011, 2018
60	Void reactivity aspect and fuel conversion potential of heavy water cooled thorium reactor,	International Journal of Energy Research	42 (1), 171-177, 2018
61	Design Study of Small Modified CANDLE based Long Life Gas Cooled Fast Reactors	Energy Procedia	131, 6-14, 2017
62	Study of Natural Convection Passive Cooling System for Nuclear Reactors	Journal of Physics: Conference Series	877 (1), 012047, 2017
63	Preliminary Study of 20 MWth Experiment Power Reactor based on Pebble Bed Reactor	Journal of Physics: Conference Series	877 (1), 012058, 2017
64	Fuel Sustainability And Actinide Production Of Doping Minor Actinide In Water-Cooled Thorium Reactor	Journal of Physics: Conference Series	877 (1), 012019, 2017
65	Thorium Fuel Utilization Analysis on Small Long Life Reactor for Different Coolant Types	Journal of Physics: Conference Series	877 (1), 012060, 2017
66	Comparative Analysis on Nuclear Fuel Sustainability Aspect of FBR	Journal of Physics: Conference Series	799 (1), 012006, 2017
67	Analysis on Reactor Criticality Condition and Fuel Conversion Capability Based on Different Loaded Plutonium Composition in FBR Core	Journal of Physics: Conference Series	799 (1), 012026, 2017
68	Design Concept Of Small Long-Life PWR Using Square And Hexagonal Thorium Fuel	ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences	VOL. 11 (2) 830-832, 2016
69	S Permana., et al , Reactor core and actinide production evaluation based on	International journal of hydrogen energy	Vol, 41, Hal 7076 (2016).

No	Judul Artikel Ilmiah	Nama Jurnal	Volum/ Nomor/Tahun
	different loading material of recycled spent nuclear fuel of LWR in FBR		
70	Actinide composition analysis of light water reactor (LWR) for different reactor condition of burnup and cooling time	ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences	Vol. 10 (22), pp. 17212-17218, 2015
71	Comparative Studies on Plutonium and Minor Actinides Utilization in Small Molten Salt Reactors with Various Powers and Core Sizes	Energy Procedia	Vol 71, Hal 62-68, 2015
72	Analysis on Proliferation Resistance Factor and Fuel Breeding Capability Based on Even Mass Plutonium Isotope Compositions	Energy Procedia	Vol 71, Hal 182-190, 2015
73	Power Flattening on Design Study of Small Long-Life Boiling Water Reactor (BWR) with Tight Lattice Thorium Nitride Fuel	Applied Mechanics & Materials	Vol. 751 Hal. 257-262, 2015
74	Analysis on isotopic plutonium barrier based on spent nuclear fuel of LWR	Annals of Nuclear Energy	Vol. 75, Hal. 116122, 2015

## VII. PENGHARGAAN

No	Jenis Penghargaan	Institusi Pemberi Penghargaan	Tahun
1	Reactor Physics Award	Atomic Energy Society of Japan (AESJ), Reactor Physics Division,	2008
2	Best Presentation Award	Inter-COE international Symposium on Energy Systems, Energy Research and Human Resources Developments	2006
3	Penghargaan Satya Lencana X Tahun	Presiden Republik Indonesia	2022

## VIII. SERTIFIKASI

No	Jenis Sertifikasi	Bidang Studi	Nomor Registrasi Pendidik	Nomor SK Sertifikasi	Tahun Sertifikasi
1	Sertifikasi Profesi	Teknik Nuklir (dan atau Ilmu Nuklir Lain)	14100200100249	0.003.21.1.2.00005624	2021
2	Sertifikasi Dosen	Fisika	14100200100249	140010030041	2014





📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,  
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132  
☎ +62 22 20469057  
🌐 [www.itbpress.id](http://www.itbpress.id)  
✉ [office@itbpress.id](mailto:office@itbpress.id)  
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92  
APPTI No. 005.062.1.10.2018

### Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132  
E-mail: [sekretariat-fgb@itb.ac.id](mailto:sekretariat-fgb@itb.ac.id)  
Telp. (022) 2512532

🌐 [fgb.itb.ac.id](http://fgb.itb.ac.id)    [FgbItb](#)    [FGB\\_ITB](#)  
 [@fgbitb\\_1920](#)    [Forum Guru Besar ITB](#)

ISBN 978-623-297-410-4

