



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



PENGEMBANGAN BAHAN BAKAR PADAT ALTERNATIF UNTUK PEMENUHAN ENERGI BERKELANJUTAN DI INDONESIA

Profesor Toto Hardianto

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara
Institut Teknologi Bandung

**Aula Barat ITB
19 Juli 2025**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**PENGEMBANGAN BAHAN BAKAR
PADAT ALTERNATIF UNTUK
PEMENUHAN ENERGI
BERKELANJUTAN
DI INDONESIA**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**PENGEMBANGAN BAHAN BAKAR
PADAT ALTERNATIF UNTUK
PEMENUHAN ENERGI
BERKELANJUTAN
DI INDONESIA**

Prof. Toto Hardianto

19 Juli 2025
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:
Pengembangan Bahan Bakar Alternatif
untuk Pemenuhan Energi Berkelanjutan di Indonesia

Penulis : Prof. Toto Hardianto
Reviewer : Prof. Ari Darmawan Pasek

Editor Bahasa : Rina Lestari
Cetakan I : 2025

ISBN : 978-623-297-744-0
e-ISBN : 978-623-297-745-7 (PDF)



📍 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

Ya Rabb, Kaulah sumber ilmu dan pencipta segala sesuatu.
Ketika aku mencipta, Kaulah yang membukakan rahasianya.
Ketika aku berinovasi, Kaulah yang memberikan inspirasi.
Aku hanyalah instrumen yang Kau gunakan untuk
mengungkapkan keagungan dan keindahan-Mu.

PRAKATA

Bismillahirrahmanirrahim

Alhamdulillah robbil ‘alamin, puji syukur penulis panjatkan kepada Allah Swt. atas rahmat dan berkah-Nya buku orasi ilmiah ini dapat diselesaikan dan diterbitkan. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar ITB atas dukungan dalam pencapaian jabatan Guru Besar ini dan kesempatan untuk menyampaikan orasi ilmiah pada Sidang Terbuka FGB ITB pada tanggal 19 Juli 2025.

Melalui naskah ini, disajikan perjalanan penelitian dan pengembangan bahan bakar dalam rangka berkontribusi mendukung pemenuhan kebutuhan energi yang berkelanjutan. Fokus penelitian didasarkan pada perumusan kebutuhan energi ke depan, melalui pemodelan Sistem Pengelolaan Energi (SPE) Nasional yang dirancang untuk mendukung seluruh aspek kehidupan yang berkelanjutan. Selanjutnya objek penelitian difokuskan pada salah satu jenis bahan bakar, yaitu batubara, dan beberapa jenis material yang bisa dikonversi menjadi bahan bakar, yaitu material gambut, biomassa limbah, dan sampah kota (*Municipal Solid Waste*, MSW). Penyajian dimulai dengan memuliakan bahan bakar yang ada melalui peningkatan kualitas batubara sebagai sumber energi yang melimpah di Indonesia walaupun tidak bersifat terbarukan, dilanjutkan dengan menjajaki pengembangan potensi energi yang belum banyak dimanfaatkan untuk dijadikan energi baru, yaitu konversi gambut menjadi bahan bakar padat, serta pengembangan energi yang bersifat terbarukan, yaitu biomassa limbah dan sampah kota.

Selain topik utama di atas, disajikan juga tentang kegiatan lain yang masih dalam lingkup kepakaran, yaitu pengembangan pengering jagung bergerak (*Mobile Corn Dryer*, MCD) sebagai terapan dari ilmu dan rekayasa termal.

Semoga tulisan ini dapat menambah wawasan dan bermanfaat bagi para pembaca.

Bandung, 19 Juli 2025

Toto Hardianto

SINOPSIS

Energi dalam kehidupan manusia selalu menjadi topik sangat penting dan menarik karena kehidupan selalu memerlukan energi untuk menunjang seluruh aktivitasnya. Perjalanan peradaban dari zaman purba sampai pada zaman modern ini menunjukkan kebutuhan energi yang selalu meningkat sangat pesat untuk menjamin keberlangsungannya. Tetapi, sayang bahwa kualitas daya dukung alam semakin menurun akibat eksplorasi energi, bahkan sudah sampai pada taraf yang mengkhawatirkan sehingga perlu diadakan langkah pencegahan degradasi daya dukung alam dengan menganalisis akar permasalahan dan mencari solusinya.

Akar permasalahan dari pemakaian energi saat ini adalah bahwa pemenuhan energi primer dunia masih didominasi oleh bahan bakar fosil dengan unsur utama karbon (C) dan Hidrogen (H). Sebetulnya alam juga bersiklus memproduksi bahan bakar fosil, tetapi berlangsung dalam waktu yang sangat lama, sehingga terdapat dua akibat utama dari keadaan ini, yaitu semakin menipisnya cadangan bahan bakar fosil akibat eksplorasi yang berlebihan dan pengumpulnya karbon dioksida (CO₂) hasil pembakaran yang stagnan di atmosfer sehingga berdampak terjadinya fenomena pemanasan global dan perubahan iklim. Kondisi ini menyebabkan bahan bakar fosil dinyatakan sebagai energi yang tidak terbarukan. Solusi untuk mengatasi permasalahan energi dunia secara global adalah dengan mengganti energi konvensional dengan energi yang bersifat terbarukan melalui tahapan yang menjamin terpenuhinya terus kebutuhan energi secara berkelanjutan.

Langkah solusi permasalahan energi meliputi beberapa tahap menurut kepentingan nasional dalam rangka menjaga keseimbangan dan kestabilan ekonomi, sosial, dan lingkungan. Dimulai dari pendataan, pemetaan, dan analisis mengenai sumber energi yang ada di Indonesia serta kebutuhan energinya di tingkat nasional. Dilanjutkan dengan mempelajari model sistem pengelolaan energi nasional untuk mendapatkan informasi tentang kebijakan energi nasional, kemudian mengembangkan beberapa jenis bahan bakar alternatif dalam rangka merealisasikan dukungan kebijakan energi nasional. Dalam hal batubara, berkaitan dengan cadangan yang besar mencapai total 99

miliar ton, adalah dengan memberdayakannya agar bisa dimanfaatkan dengan optimal memenuhi kebutuhan sesuai dengan target tahunan yang sudah direncanakan. Dalam hal ini, dikembangkan metode pengeringan batubara menggunakan media uap panas lanjut untuk menghindari terjadinya pembakaran saat pengeringan, dan menjaga tetap kering melalui metode pembriketan panas tanpa perekat dari luar (*hot binderless briquetting method*). Hasilnya adalah batubara naik kualitas nilai kalornya menjadi kelas batubara menengah bahkan tinggi. Dengan demikian diharapkan dapat berkontribusi mengurangi emisi CO₂ melalui pola pemakaian yang efisien, walaupun tidak banyak. Dalam waktu yang bersamaan, dikembangkan juga sumber energi yang bersifat baru, terutama yang terbarukan. Dalam hal ini, pengembangan tersebut difokuskan pada konversi beberapa jenis materi padatan menjadi bahan bakar padat. Gambut (*peat*), yang merupakan cikal bakal batubara, mempunyai potensi besar bila dikonversikan menjadi bahan bakar padat, terutama karena Indonesia mempunyai daerah dengan kandungan gambut terbesar ketiga dunia. Metode konversinya menggunakan proses torefaksi. Hasil torefaksi gambut menjadi bahan bakar padat merupakan bentuk energi baru tetapi belum tergolong yang terbarukan mengingat proses penggabutan (*peatification*) oleh alam berlangsung “lama”. Konversi materi yang dapat digolongkan sebagai energi baru dan terbarukan dalam pengembangan ini meliputi limbah biomassa dan sampah kota (*Municipal Solid Waste, MSW*) karena siklus terjadinya di alam tergolong “pendek” waktunya. Metode konversinya menggunakan metode *hydrothermal* dan torefaksi juga, dan dapat menghasilkan bahan bakar padat setara batubara kelas menengah. Melalui cara ini, didapatkan dua benefit, yaitu menyelesaikan permasalahan limbah/sampah dan sekaligus mendapatkan bahan bakar yang termasuk energi baru dan terbarukan.

Pengembangan bahan bakar padat ini membutuhkan beberapa metode yang diramu dalam suatu urutan proses dengan tujuan mendapatkan hasil yang terbaik dari sisi densitas energi produk dan mengutamakan efisiensi dan efektivitas dalam prosesnya sehingga memerlukan energi yang minimum. Buku ini memaparkan kegiatan-kegiatan tersebut yang dilakukan oleh penulis di Institut Teknologi Bandung sejak tahun 1996 sampai sekarang dan akan dilanjutkan sebagai bentuk realisasi pendalaman kepakaran dalam bidang bahan bakar padat.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	vii
SINOPSIS	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Pasokan Energi Primer Indonesia	2
1.3 Porsi Batubara dan Biomassa pada Pasokan Energi primer	4
1.4 Aspek Emisi CO ₂ dari Berbagai Sektor Kegiatan	7
2 PETA JALAN PENGEMBANGAN BAHAN BAKAR ALTERNATIF DALAM RANGKA PEMENUHAN ENERGI YANG BERKELANJUTAN	9
2.1 Peta Jalan Pengembangan Bahan Bakar Keseluruhan.....	9
2.2 Penelaahan Masing-Masing Pengembangan Objek.....	11
3 PENGEMBANGAN MODEL SISTEM PENGELOLAAN ENERGI (SPE) NASIONAL UNTUK MENCAPAI KETAHANAN DAN KEMANDIRIAN ENERGI YANG BERKELANJUTAN SERTA KESEPAKATAN PARIS BERBASIS DINAMIKA SISTEM	13
3.1 Lingkup Sistem Pengelolaan Energi (SPE) Nasional.....	13
3.2 Pengembangan Model SPE Nasional.....	15
4 PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PENINGKATAN KUALITAS BATUBARA (<i>COAL UPGRADING TECHNOLOGY</i> , CUT) DAN PEMBANGUNAN PABRIK PERCOBAANNYA	21
4.1 Sumberdaya Batubara Indonesia.....	22
4.2 Metode Peningkatan Kualitas Batubara Versi CUT	23
4.3 Pabrik Percobaan (<i>Pilot Plant</i>) Peningkatan Kualitas Batubara dengan Metode CUT.....	24
4.4 Rencana Pengembangan Menuju Aplikasi Skala Komersial ...	27
5 PENGEMBANGAN TEKNOLOGI KONVERSI GAMBUT MENJADI BAHAN BAKAR PADAT SETARA BATUBARA MELALUI PROSES TOREFAKSI	29
5.1 Pengantar: Energi Baru dari Lahan Basah Indonesia	29
5.2 Metodologi Penelitian: Dari Lab ke Skala Industri	32

5.3	Signifikansi Inovasi: Akselerasi “Pembatubaraan”	36
5.4	Catatan Penutup dari Pengembangan Gambut.....	37
6	PENGEMBANGAN TEKNOLOGI KONVERSI BIOMASSA MENJADI BAHAN BAKAR PADAT SETARA BATUBARA MELALUI PROSES HIDROTERMAL DAN TOREFAKSI	39
6.1	Sumberdaya Biomassa Indonesia.....	39
6.2	Biomassa Sebagai Bahan Bakar	43
6.3	Catatan Penutup dari Pengembangan Biomassa.....	51
7	PENGEMBANGAN PENDING JAGUNG BERGERAK (<i>MOBILE CORN DRYER</i> , MCD)	53
7.1	Permasalahan Jagung pada Masa Pascapanen	53
7.2	Pending Jagung Bergerak	54
8	PENUTUP	57
6	UCAPAN TERIMA KASIH	59
	DAFTAR PUSTAKA	61
	CURRICULUM VITAE.....	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Pasokan energi Primer Indonesia tahun 2022-2033 (Suharyati dkk, 2023)	4
Gambar 1.2	Perbandingan Pasokan Energi Skenario Hymne dan Skenario Mars tahun 2033 (Suharyati dkk, 2023)	4
Gambar 1.3	Pasokan Energi Primer Fosil (Suharyati dkk, 2023)	5
Gambar 1.4	Pasokan Energi Primer Non-Fosil (Suharyati dkk, 2023)	6
Gambar 1.5	Pasokan Energi Terbarukan dan energi Baru (ETEB) (Suharyati dkk, 2023)	6
Gambar 1.6	Emisi CO ₂ per Sektor Kegiatan (Suharyati dkk, 2023)	7
Gambar 2.1	Peta jalan pengembangan bahan bakar alternatif dalam rangka pemenuhan energi yang berkelanjutan	10
Gambar 3.1	Konsep Sistem Pengelolaan Energi Nasional (Hutrindo, 2022)	14
Gambar 3.2	Pemetaan area keterkaitan tujuan beserta indikatornya pada model SPE (Hutrindo, 2022)	16
Gambar 3.3	Ilustrasi interaksi Model SPE dengan tiga aspek utama (Hutrindo, 2022)	16
Gambar 3.4	Model SPE yang dipergunakan DEN (kiri) dan KESDM (kanan) (Hutrindo, 2022)	17
Gambar 3.5	Model SPE yang dipergunakan BPPT (kiri) dan Bappenas (kanan) (Hutrindo, 2022)	18
Gambar 3.6	Model SPE yang dipergunakan KLHK (kiri) dan APERC - IEA (kanan) (Hutrindo, 2022)	18
Gambar 4.1	Peta jalan pengembangan bahan bakar alternatif bagian batubara	21
Gambar 4.2	Sebaran sumberdaya batubara Indonesia	22
Gambar 4.3	Proses pengeringan dan pembriketan metode CUT	24
Gambar 4.4	Diagram alir proses dalam bentuk blok dari pabrik percobaan kapasitas 7 ton/jam	25
Gambar 4.5	Lokasi dan <i>lay out</i> pabrik percobaan kapasitas 7 ton/jam	26
Gambar 4.6	Konsep perancangan pabrik skala komersial kapasitas 150 ton/jam	28

Gambar 5.1	Peta Jalan Pengembangan Bahan Bakar Alternatif Bagian Gambut.....	29
Gambar 5.2	Sebaran sumberdaya gambut Indonesia.....	30
Gambar 5.3	Diagram proses pengeringan dan torefaksi gambut	31
Gambar 5.4	Dekomposisi Lignoselulosa pada proses pemanasan (Bergman, 2004)	31
Gambar 5.5	Skematik dan alat eksperimen <i>Batch</i> (Haryadi, 2006).....	33
Gambar 5.6	Nilai Kalor produk torefaksi gambut pada berbagai waktu dan temperatur (Haryadi, 2006)	33
Gambar 5.7	Diagram blok sistem torefaksi kontinu (Haryadi, 2006)	34
Gambar 5.8	Foto hasil torefaksi pada berbagai temperatur dan waktu tinggal (Haryadi, 2006)	35
Gambar 5.9	Kesetaraan hasil torefaksi dengan peringkat batubara (Haryadi, 2006)	35
Gambar 6.1	Peta jalan pengembangan bahan bakar alternatif bagian biomassa	39
Gambar 6.2	Sebaran Potensi Bioenergi di Indonesia (Suharyati dkk, 2023)	41
Gambar 6.3	Komposisi Sampah Kota Bandung (Amrul, 2014)	42
Gambar 6.4	Reaktor torefaksi skala lab jenis <i>batch</i>	44
Gambar 6.5	Kurva mass yield selama proses torefaksi (Amrul, 2014).....	45
Gambar 6.6	Nilai kalor hasil torefaksi daun (a), torefaksi ranting (b), torefaksi nasi (c), torefaksi kulit jeruk (d) (Amrul, 2014)	46
Gambar 6.7	Bagan konsep konversi simultan tiga jenis biomassa menggunakan torefaksi multiproses (Efendi, 2025).....	48
Gambar 6.8	Diagram van krevelen konversi simultan tiga jenis biomassa menggunakan torefaksi multi-proses (Efendi, 2025)	49
Gambar 7.1	Diagram rumus durasi penyimpanan fungsi T dan MC.....	53
Gambar 7.2	Diagram alir proses pengering jagung bergerak.....	54
Gambar 7.3	Gambar isometri pengering jagung bergerak.....	55
Gambar 7.4	Gambar isometri pengering jagung bergerak.....	55
Gambar 8.1	Bagian Peta Jalan Pengembangan Bahan Bakar Alternatif yang sudah terealisasi	57

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Tujuan dan Lingkup SPE yang Dikembangkan (Hutrindo, 2022)	15
Tabel 4.1	Perbandingan karakter batubara antara bahan baku dan hasil CUT	27
Tabel 5.1	Cadangan gambut empat negara terbesar di dunia	30
Tabel 6.1	Potensi Energi Baru-Terbarukan Indonesia (Suharyati dkk, 2023)	40
Tabel 6.2	Variasi komponen biomassa pada konversi simultan biomassa limbah melalui torefaksi multiproses (Efendi, 2025)	48
Tabel 6.3	Peningkatan nilai kalor pada konversi simultan biomassa limbah melalui torefaksi multiproses (Efendi, 2025)	50
Tabel 6.4	Penurunan potensi slagging foiling pada konversi simultan biomassa limbah melalui torefaksi multi-proses (Efendi, 2025)	51

1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Permasalahan energi dalam kehidupan manusia selalu menjadi topik sangat penting dan menarik karena kehidupan di bumi ini selalu memerlukan energi untuk menunjang seluruh aktivitasnya. Perjalanan peradaban manusia dari zaman purba sampai pada zaman modern ini menunjukkan kebutuhan energi yang meningkat sangat pesat untuk menjamin keberlangsungannya. Namun, keadaan saat ini menunjukkan bahwa kualitas daya dukung alam untuk kehidupan semakin menurun akibat eksplorasi energi, bahkan sudah sampai pada taraf yang mengkhawatirkan sehingga perlu diadakan langkah pencegahan degradasi daya dukung alam, dengan menganalisis akar permasalahan dan mencari solusinya.

Akar permasalahan dari pemakaian energi saat ini adalah bahwa pemenuhan energi primer dunia yang terus meningkat masih didominasi oleh bahan bakar fosil dengan unsur utama karbon (C) dan hidrogen (H). Walaupun alam juga bersiklus memproduksi bahan bakar fosil, tetapi membutuhkan waktu yang sangat lama, sehingga ada dua akibat utama dari keadaan ini, yaitu semakin menipisnya cadangan bahan bakar fosil akibat eksplorasi yang berlebihan dan pengumpulnya karbon dioksida (CO₂) hasil pembakaran yang stagnan di atmosfer sehingga berdampak terjadinya fenomena pemanasan global dan perubahan iklim. Kondisi ini menyebabkan bahan bakar fosil dinyatakan sebagai energi yang tidak terbarukan. Solusi untuk mengatasi permasalahan energi dunia secara global adalah dengan mengganti energi konvensional dengan energi yang bersifat terbarukan. Langkah ini tidak bisa diambil secara instan melainkan harus secara gradual menurunkan pemakaian bahan bakar fosil untuk digantikan oleh energi yang bersifat terbarukan.

Langkah solusi permasalahan energi meliputi beberapa tahap menurut kepentingan nasional dalam rangka menjaga keseimbangan dan kestabilan ekonomi, sosial, dan lingkungan. Dimulai dari pendataan, pemetaan, dan analisis mengenai sumber energi yang ada di Indonesia serta kebutuhan energinya di tingkat nasional. Dilanjutkan dengan mempelajari model sistem pengelolaan energi nasional untuk mendapatkan informasi tentang kebijakan energi nasional, kemudian mengembangkan beberapa jenis bahan bakar

alternatif dalam rangka merealisasikan dukungan kebijakan energi nasional. Dalam hal batubara, yang mana Indonesia mempunyai cadangan yang besar, langkahnya adalah memberdayakan batubara yang ada agar bisa dimanfaatkan dengan optimal memenuhi kebutuhan sesuai dengan target tahunan yang sudah direncanakan. Dengan demikian diharapkan dapat berkontribusi mengurangi emisi CO₂ melalui pola pemakaian yang efisien, walaupun tidak banyak. Dalam waktu yang bersamaan, dikembangkan sumber energi yang bersifat baru, terutama yang terbarukan. Dalam hal ini, pengembangan tersebut difokuskan pada konversi beberapa jenis materi padatan menjadi bahan bakar padat. Gambut (*peat*), yang merupakan cikal bakal batubara, mempunyai potensi besar bila dikonversikan menjadi bahan bakar padat, terutama karena Indonesia mempunyai daerah dengan kandungan gambut terbesar ketiga dunia. Hasil konversi gambut menjadi bahan bakar padat merupakan bentuk energi baru. Konversi materi yang dapat digolongkan sebagai energi baru dan terbarukan dalam pengembangan ini meliputi limbah biomassa dan sampah kota (*Municipal Solid Waste*, MSW), sehubungan dengan siklus terjadinya di alam yang tergolong “pendek” waktunya. Dengan demikian, ada dua benefit yang akan didapat, yaitu menyelesaikan permasalahan limbah dan sekaligus mendapatkan bahan bakar yang termasuk energi baru dan terbarukan.

Pengembangan bahan bakar padat ini membutuhkan beberapa metode yang diramu dalam suatu urutan proses dengan tujuan mendapatkan hasil yang terbaik dari sisi densitas energi produk dan mengutamakan efisiensi dan efektivitas dalam prosesnya sehingga memerlukan energi yang minimum. Buku ini memaparkan kegiatan-kegiatan tersebut yang dilakukan oleh penulis di Institut Teknologi Bandung sejak tahun 1996 sampai sekarang dan akan dilanjutkan sebagai bentuk realisasi pendalaman kepakaran dalam bidang bahan bakar padat.

1.2 Pasokan Energi Primer Indonesia

Outlook Energi Indonesia 2023 (Suharyati dkk, 2023) telah mendata sumber energi di dalam negeri beserta potensinya dan melakukan pemetaan kebutuhan energi dari tahun 2022 yang selanjutnya melakukan prediksi kebutuhan energi nasional sampai dengan tahun 2033, yaitu prediksi 10 tahun ke depan dari 2023. Prediksi kebutuhan energi dilakukan melalui dua skenario:

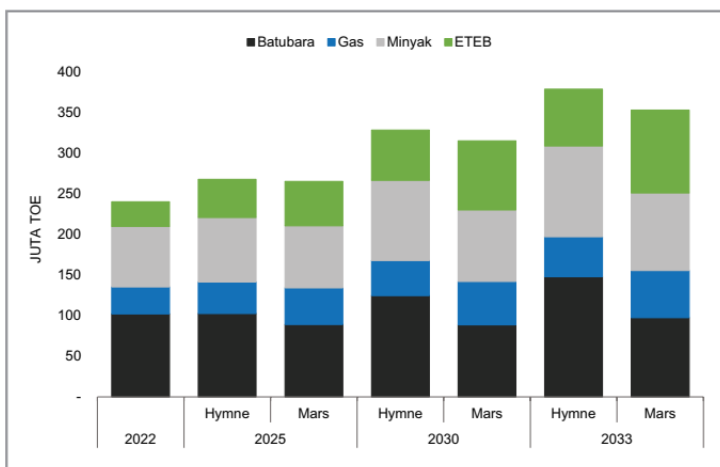
- a. Skenario Hymne, yaitu skenario untuk prediksi kebutuhan energi Indonesia bila perkembangan keadaan negara mengikuti perkembangan pasar, atau yang dikenal dengan skenario *Business as Usual* (BAU).
- b. Skenario Mars, yaitu skenario untuk memprediksi kebutuhan energi negara bila Indonesia ditargetkan menjadi negara maju pada tahun 2045 dan memenuhi komitmen *Nett Zero Emission* (NZE) pada tahun 2060.

Pada Outlook Energi Indonesia 2023, sistem pengelompokan energi primer dibagi dalam dua kategori besar, yaitu:

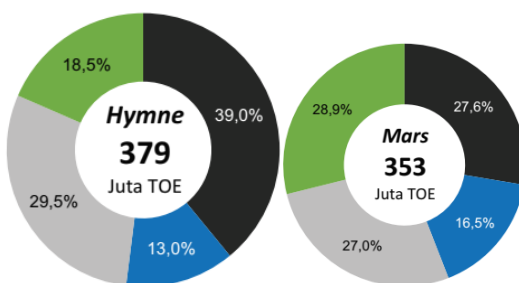
- a. Energi Primer Fosil, yaitu kategori energi yang tidak baru dan tidak terbarukan. Energi fosil ini terdiri atas batubara, gas, dan minyak bumi.
- b. Energi Primer non Fosil, yaitu kategori Energi Terbarukan maupun Energi Baru (ETEB), yang terdiri atas Hidro, Panas Bumi, Surya, Bayu, Bioenergi, Biofuel, Nuklir, dan ETEB lainnya.

Porsi pemakaian ETEB dibandingkan dengan energi fosil dari waktu ke waktu diproyeksikan terus bertambah, namun proporsinya masih di bawah energi fosil.

Menurut Outlook Energi Indonesia 2023, pasokan energi primer Indonesia tahun 2022, 2025, 2030, dan 2033 ditunjukkan melalui Gambar 1.1. Pada gambar tersebut, data 2022 adalah data riil sedangkan data 2025, 2030, dan 2033 adalah prediksi berdasarkan Skenario Hymne dan Skenario Mars. Pasokan energi total pada Skenario Mars dirancang lebih rendah dari Skenario Hymne, sedangkan porsi ETEB dirancang sebaliknya. Hal ini sesuai dengan tujuan menjadi negara maju pada 2045 yang menargetkan NZE pada 2060, dengan keharusan penggunaan energi seefisien mungkin. Secara khusus hal ini ditunjukkan melalui *pie chart* Gambar 1.2 untuk prediksi pasokan energi primer tahun 2033. Pasokan energi primer total pada Skenario Mars sebesar 353 juta TOE, lebih kecil dari Skenario Hymne yang totalnya 379 juta TOE. Sedangkan porsi ETEB pada Skenario Mars sebesar 28,9%, lebih besar dari Skenario Hymne yang besarnya 18,5%. Dengan demikian, usaha menuju target Indonesia maju tahun 2045 dan NZE tahun 2060 dapat konsisten dikejar.



Gambar 1.1 Pasokan energi Primer Indonesia tahun 2022-2033 (Suharyati dkk, 2023)

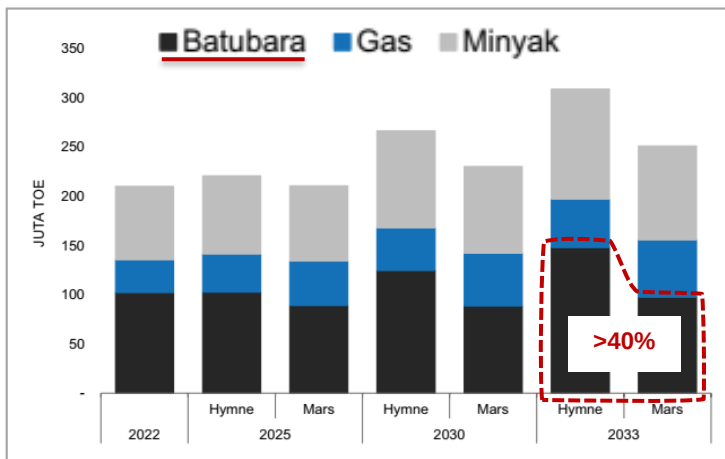


Gambar 1.2 Perbandingan Pasokan Energi Skenario Hymne dan Skenario Mars tahun 2033 (Suharyati dkk, 2023)

1.3 Porsi Batubara dan Biomassa pada Pasokan Energi primer

Porsi energi fosil pada pasokan energi primer tahun 2033 diprediksi masih lebih besar dari pada ETEB sebagaimana ditunjukkan melalui Gambar 1.1 dan Gambar 1.2. Secara lebih rinci, porsi energi fosil pada pasokan energi primer tersebut ditunjukkan melalui Gambar 1.3.

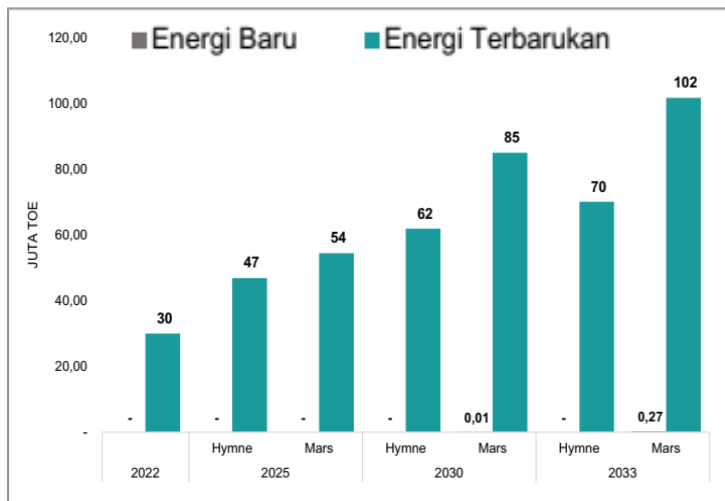
Pada Gambar 1.3 ditunjukkan bahwa sampai dengan tahun 2033 keberadaan batubara masih tetap ditargetkan ada dengan porsi yang diharapkan semakin mengecil. Walaupun demikian, porsi tersebut berfluktuasi karena kebutuhan akan batubara sebagai energi belum bisa digantikan oleh jenis lainnya.



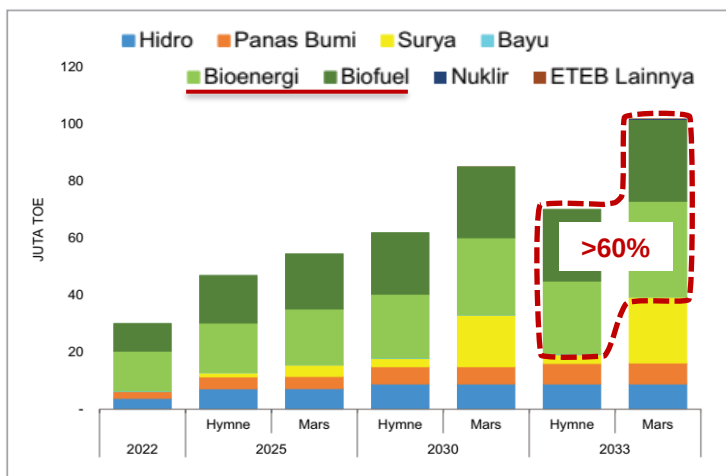
Gambar 1.3 Pasokan Energi Primer Fossil (Suharyati dkk, 2023)

Prediksi pasokan pada tahun 2033 menunjukkan bahwa porsi batubara terhadap sisi bahan bakar fosil keseluruhan masih besar, di atas 40% pada Skenario Mars bahkan lebih tinggi lagi jika yang terjadi adalah skenario Hymne. Oleh karena itu, maka penanganan batubara masih menjadi penting untuk mendapat perhatian agar bisa memberikan manfaat sesuai harapan, dengan efek samping negatif yang bisa diminimalisir. Pengembangan teknologi peningkatan kualitas batubara menjadi salah satu langkah yang dilakukan oleh penulis.

Porsi pasokan energi primer nonfosil tahun 2022-2033, yaitu porsi energi keseluruhan dikurangi dengan porsi energi fosil, ditunjukkan melalui Gambar 1.4. Porsi tersebut tidak lain adalah porsi ETEB, yang secara keseluruhan menunjukkan peningkatan yang konsisten dari waktu ke waktu, terutama pada skenario Mars. Selain itu, di tahun 2030 ditargetkan juga mulai adanya energi baru yang belum tentu bersifat terbarukan. Pada Skenario Mars di Gambar 1.5, energi baru tersebut ditunjukkan sebagai energi nuklir. Selanjutnya jenis-jenis energi yang termasuk ETEB pada Gambar 1.4 diperinci lagi dalam delapan jenis energi, yaitu: energi hidro, energi panas bumi, energi surya, energi bayu, bioenergi, biofuel, energi nuklir, dan ETEB lainnya, yang secara rinci ditunjukkan melalui diagram Gambar 1.5.



Gambar 1.4 Pasokan Energi Primer Non-Fosil (Suharyati dkk, 2023)

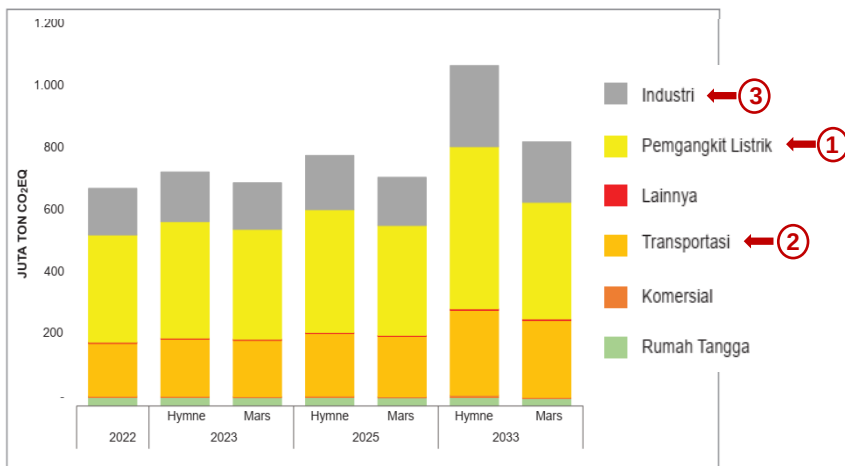


Gambar 1.5 Pasokan Energi Terbarukan dan eneri Baru (ETEB) (Suharyati dkk, 2023)

Pada Gambar 1.5 ditunjukkan bahwa porsi Bioenergi dan Biofuel secara total jumlahnya mencapai lebih dari 60%. Oleh karena itu, pengembangan Bioenergi dan Biofuel yang intensif sangat mendukung rencana keenergian negara Indonesia. Pengembangan teknologi konversi Gambut, limbah biomassa, dan sampah kota (*municipal solid waste*) menjadi bahan bakar padat yang ramah lingkungan dan bersifat terbarukan menjadi agenda penelitian yang dilakukan penulis.

1.4 Aspek Emisi CO2 dari Berbagai Sektor Kegiatan

Di samping pasokan energi primer Indonesia, perlu dipaparkan juga aspek emisi CO₂ menurut Outlook Energi Indonesia 2023 sebagai pelengkap. Hal ini dimaksudkan sebagai informasi tentang sektor kegiatan mana saja yang berkontribusi dominan dalam menghasilkan emisi CO₂, sehingga dapat ditunjukkan bahwa pengembangan bahan bakar padat alternatif pada kiprah kepakaran ini dapat menyentuh sektor-sektor tersebut, dengan harapan dapat berdampak besar secara nasional. Emisi CO₂ per sektor kegiatan ditunjukkan melalui diagram Gambar 1.6. Urutan sektor kegiatan yang dominan menghasilkan CO₂ terbesar adalah: Sektor Pembangkit Listrik, Sektor Transportasi, dan Sektor Industri. Jadi, bila pengembangan bahan bakar padat alternatif yang berkelanjutan bisa menyentuh sektor-sektor kegiatan utama di atas, maka diharapkan akan berdampak besar bagi pemenuhan energi masa depan.



Gambar 1.6 Emisi CO₂ per Sektor Kegiatan (Suharyati dkk, 2023)

Berangkat dari prediksi pasokan energi primer Indonesia sampai dengan tahun 2033 secara umum, baik berdasarkan Skenario Mars yang optimis menyongsong kemajuan maupun Skenario Hymne yang mendasarkan pada pola *business as usual*, maka pasokan batubara masih dominan di antara bahan bakar fosil, yaitu di atas 40% terhadap keseluruhan bahan bakar fosil, demikian juga untuk Bioenergi dan Biofuel yang prediksi pasokannya di atas 60% terhadap keseluruhan ETEB, sehingga pengembangan bahan bakar padat alternatif untuk mendukung pemenuhan energi berkelanjutan di Indonesia

sangat relevan, terlebih lagi bila dihubungkan dengan sektor kegiatan penghasil CO2 terbesar, yaitu Sektor Pembangkit Listrik, maka diharapkan akan berdampak besar.

2 PETA JALAN PENGEMBANGAN BAHAN BAKAR ALTERNATIF DALAM RANGKA PEMENUHAN ENERGI YANG BERKELANJUTAN

Dalam rangka pengembangan bahan bakar alternatif untuk memenuhi kebutuhan energi yang berkelanjutan, terbentuklah jejak kegiatan awal yang selanjutnya dirumuskan dalam bentuk peta jalan yang teratur sehingga mudah dan efisien untuk dilaksanakan. Secara keseluruhan, peta jalan yang dibuat penulis ditunjukkan melalui Gambar 2.1.

2.1 Peta Jalan Pengembangan Bahan Bakar Keseluruhan

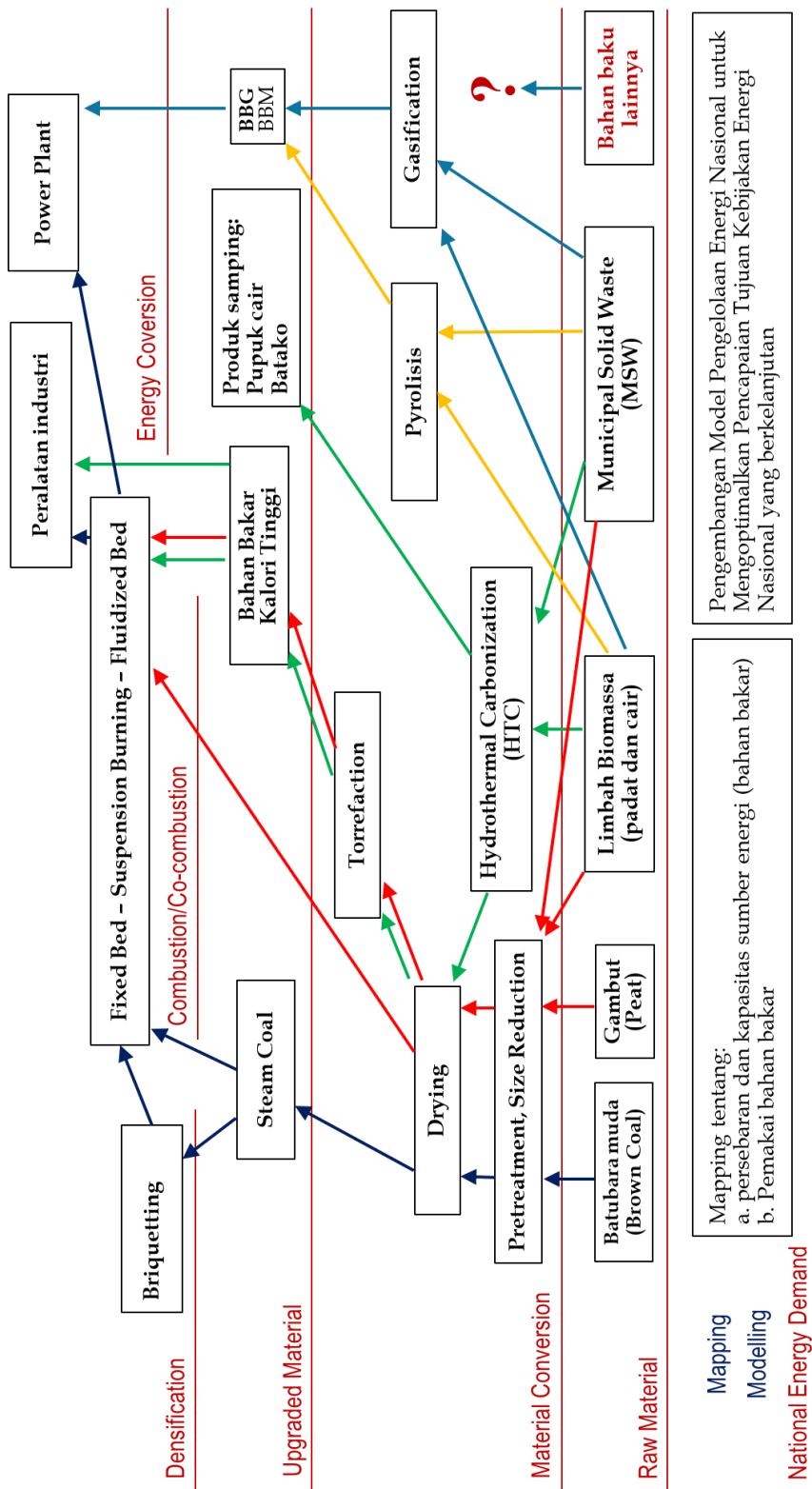
Peta jalan secara keseluruhan yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 merupakan visi ke depan yang tidak hanya untuk mengembangkan bahan bakar padat, tetapi juga dapat meluas ke bahan bakar cair maupun bahan bakar gas. Langkah-langkahnya dapat dijelaskan sebagai berikut.

Pada langkah awal, harus dipelajari terlebih dahulu **kebutuhan energi nasional (*national energy demand*)**. Dalam hal ini, ada dua objek yang menjadi fokus, yaitu:

- a. Pemetaan (*mapping*) tentang persebaran dan kapasitas sumber energi (bahan bakar) di satu pihak, dan pemakai energi di pihak lain.
- b. Pemodelan, yaitu pengembangan model pengelolaan energi nasional untuk mengoptimalkan pencapaian tujuan kebijakan energi nasional yang berkelanjutan.

Setelah itu, dilanjutkan dengan penentuan **bahan baku (*raw material*)** potensial, meliputi:

- a. bahan bakar padat konvensional yang dominan dan berprospek, yaitu batubara,
- b. material bahan bakar padat baru, yaitu gambut (*peat*),
- c. material yang berpotensi untuk dikonversi menjadi bahan bakar padat kategori ETEB, dalam hal ini adalah limbah biomassa dan sampah kota (*Municipal Solid Waste, MSW*), dan
- d. bahan baku lainnya.



Gambar 2.1 Peta jalan pengembangan bahan bakar alternatif dalam rangka pemenuhan energi yang berkelanjutan

Selanjutnya memilih proses-proses **konversi bahan baku (*material conversion*)** yang memungkinkan untuk mengubah bahan baku menjadi bahan bakar berkualitas, meliputi proses-proses: *pretreatment*, *size reduction*, pengeringan (*drying*), *hydrothermal carbonization* (HTC), torefaksi, pirolisis, dan gasifikasi.

Maka, sampai pada material hasil, yaitu **bahan bakar dengan kualitas yang dikehendaki (*upgraded material*)**, meliputi *steam coal*, bahan bakar kalori tinggi, bahan bakar minyak (BBM), bahan bakar gas (BBG), dan produk samping (pupuk cair, batako, dll.). Proses lanjutan masih bisa dilakukan untuk keperluan yang lebih spesifik, yaitu pembriketan. Selain itu, dikembangkan juga pemakaian material hasil pada tungku bahan bakar padat yang meliputi tungku-tungku *fixed bed*, *suspension burning*, dan *fluidized bed* dari peralatan industri maupun pembangkit daya (*power plant*).

2.2 Penelaahan Masing-Masing Pengembangan Objek

Pada subbab ini, dijelaskan masing masing pengembangan bahan bakar padat, termasuk pengembangan model sistem pengelolaan energinya.

- a. Di tingkat kebutuhan energi nasional, dikembangkan model sistem pengelolaan energi (SPE) nasional untuk mencapai ketahanan dan kemandirian energi yang berkelanjutan, serta kesepakatan Paris, berbasis dinamika sistem. Pengembangan model ini bertujuan untuk memodelkan sistem pengelolaan energi dengan target tertentu berdasarkan anggapan-anggapan yang sedekat mungkin dengan kenyataan. Pembahasan rinci tentang pemodelan ini ada di Bab 3.
- b. Pengembangan teknologi peningkatan kualitas batubara (*Coal Upgrading Technology*, CUT) dan pembangunan pabrik percobaannya (*Pilot Plant*). Prosesnya meliputi proses panah berwarna hitam pada Gambar 2.1, dari batubara kualitas rendah sebagai bahan baku, *pretreatment*, *drying*, *briquetting*, sampai ke penggunaannya pada tungku bahan bakar padat. Pembahasan rinci pengembangan ini dilakukan di Bab 4.
- c. Pengembangan teknologi konversi gambut menjadi bahan bakar padat setara batubara melalui proses torefaksi. Prosesnya ditunjukkan melalui panah berwarna merah pada Gambar 2.1, meliputi gambut sebagai bahan baku, *pretreatment*, *drying*, torefaksi, menjadi bahan bakar padat berkalori

tinggi yang siap dipakai oleh peralatan industri maupun *power plant*. Pembahasan rinci pengembangan ini ada pada Bab 5.

- d. Pengembangan teknologi konversi biomassa menjadi bahan bakar padat setara batubara melalui proses hidrotermal dan torefaksi. Prosesnya ditunjukkan melalui panah berwarna merah dan hijau pada Gambar 2.1, meliputi bahan baku limbah biomassa dan fraksi organik sampah kota, *pretreatment* atau langsung *hydrothermal*, torefaksi, menjadi bahan bakar padat berkalori tinggi yang siap dipakai oleh peralatan industri maupun *power plant*. Pembahasan rinci pengembangan ini dilakukan pada Bab 6.

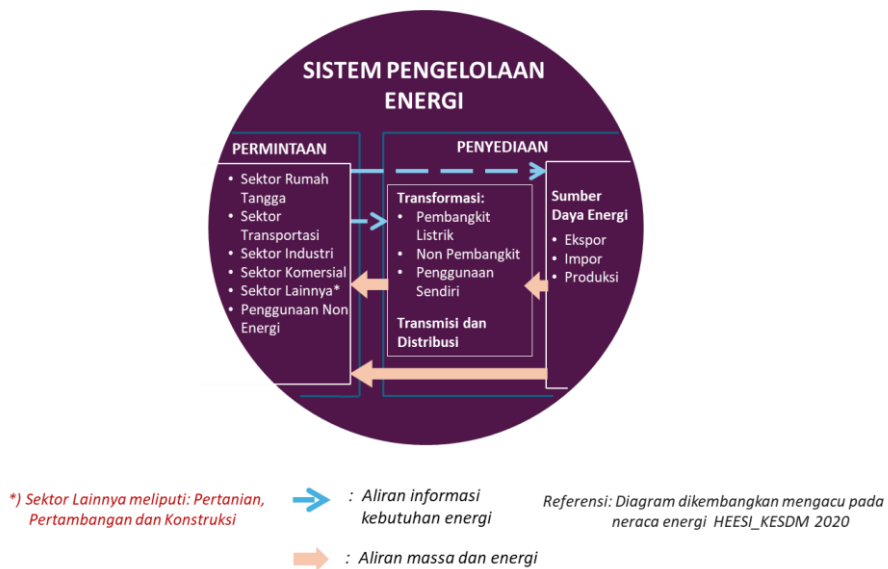
Demikian penjelasan tentang peta jalan yang menjadi pedoman dalam pengembangan bahan bakar padat alternatif untuk mendukung pemenuhan energi berkelanjutan di Indonesia. Peta jalan ini memungkinkan untuk dikembangkan untuk selain bahan bakar padat, yaitu bahan bakar cair maupun bahan bakar gas.

3 PENGEMBANGAN MODEL SISTEM PENGELOLAAN ENERGI (SPE) NASIONAL UNTUK MENCAPAI KETAHANAN DAN KEMANDIRIAN ENERGI YANG BERKELANJUTAN SERTA KESEPAKATAN PARIS BERBASIS DINAMIKA SISTEM

Negara Indonesia mempunyai cadangan energi yang besar, berupa bahan bakar fosil (batubara, gas, dan minyak bumi), dan energi terbarukan maupun energi baru (ETEB) berupa energi hidro, panas bumi, surya, bayu, bioenergi, *biofuel*, nuklir, maupun ETEB lainnya. Dalam kegiatan sehari-hari, negara juga membutuhkan energi untuk menjamin keberlangsungan hidup masyarakatnya. Pengelolaan energi secara nasional diperlukan untuk menjamin terpenuhinya kebutuhan energi secara berkelanjutan, maka diperlukan Sistem Pengelolaan Energi (SPE) secara Nasional. Pengelolaan energi yang baik adalah pengelolaan energi yang menjamin tidak terdegradasinya tiga pilar aspek kehidupan, yaitu aspek ekonomi, aspek sosial, dan aspek lingkungan. Sampai saat ini, pedoman SPE Nasional mengacu pada Peraturan Pemerintah (PP) No. 79 tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN), yang pada dasarnya memberi arah pengelolaan energi nasional jangka panjang untuk mewujudkan **kemandirian energi**, mewujudkan **ketahanan energi**, dan mendukung **pembangunan nasional berkelanjutan**. Selanjutnya, akan dibahas konsep SPE dan pengembangan pemodelannya.

3.1 Lingkup Sistem Pengelolaan Energi (SPE) Nasional

Sistem pengelolaan energi pada dasarnya adalah pengelolaan antara permintaan dan penyediaan energi secara nasional sesuai dengan arahan tertentu, dalam hal ini minimal sesuai dengan arahan Kebijakan Energi Nasional dari PP No. 79 tahun 2014, dalam rangka mencapai keadaan masyarakat yang dikehendaki, misalnya masyarakat negara maju. Secara umum SPE digambarkan melalui Gambar 3.1. Pada sisi Permintaan, terdapat berbagai sektor kehidupan yang membutuhkan energi, yaitu sektor rumah tangga, sektor transportasi, sektor industri, sektor komersial, sektor pertanian, pertambangan, konstruksi, dan penggunaan non energi. Sedangkan pada sisi penyediaan terdiri atas sumber daya energi (ekspor, impor, produksi), transformasi, dan transmisi/distribusi.



Gambar 3.1 Konsep Sistem Pengelolaan Energi Nasional (Hutrinindo, 2022)

Permintaan energi dapat dirumuskan dalam:

$$E = \sum_{i=1}^{i=n} E_i = \sum_{i=1}^{i=n} Q_i \cdot I_i \quad (3.1)$$

di mana: E = Permintaan energi
 E_i = Konsumsi energi akhir sektor
 Q_i = Total aktivitas penggunaan energi
 I_i = Intensitas energi

Penyediaan energi dirumuskan sebagai:

$$S = E + M - X + e + l \quad (3.2)$$

di mana: S = Penyediaan Energi
 E = Permintaan Energi
 M = Impor
 X = Ekspor
 e = kehilangan energi karena efisiensi teknologi
 l = Rugi-rugi pd. Transmisi dan distribusi

Perlu diketahui bahwa Indonesia telah meratifikasi Perjanjian Paris dalam Konferensi Tingkat Tinggi Perubahan Iklim PBB ke-21, COP21, tahun 2015 di Paris, yang isinya adalah komitmen Indonesia untuk mereduksi gas rumah kaca 29% melalui usaha sendiri atau bahkan sampai 41% bila mendapat

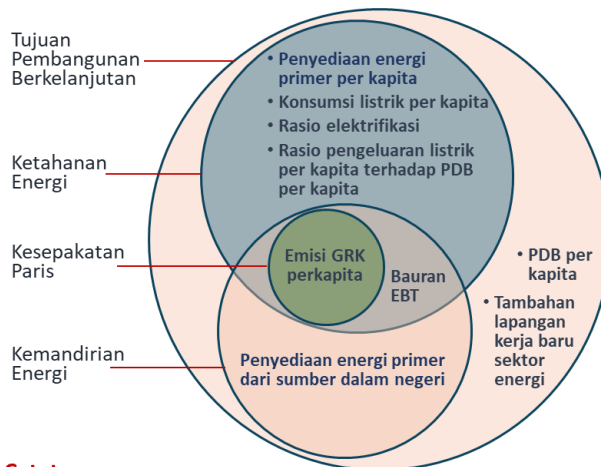
bantuan internasional, yang ditargetkan pada tahun 2030. Oleh karena itu, pemodelan SPE Nasional ini selain mengacu pada PP No. 79 tahun 2014 tentang KEN, juga memasukkan perjanjian Paris sebagai target pada aspek lingkungan. Hal ini merupakan satu point lebih dibandingkan dengan model-model SPE yang telah dipakai oleh beberapa instansi berwenang untuk memprediksi permintaan dan penyediaan energi. Secara sistematis, pemodelan SPE yang dikembangkan mempunyai tujuan, lingkup, dan referensi untuk masing-masing tujuan ditunjukkan melalui Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Tujuan dan Lingkup SPE yang Dikembangkan (Hutrinindo, 2022)

No	Tujuan SPE	Lingkup	Referensi
1	Ketahanan Energi	Meliputi 4 kondisi: 1. Ketersediaan energi 2. Akses masyarakat terhadap energi 3. Harga yang terjangkau 4. Lingkungan hidup yang terjaga	• PP 79/2014: KEN • Studi Pustaka
2	Kemandirian Energi	Ketersediaan energi yang terjamin dari potensi sumber dalam negeri	• PP 79/2014: KEN • Studi Pustaka
3	Pembangunan Berkelanjutan	Keseimbangan pertumbuhan aspek: ekonomi, sosial dan lingkungan	UN Brundtland Commission, 1987
4	Kesepakatan Paris	Konvensi menurunkan T global < 2°C di atas T bumi saat era pra-industri, pada paruh kedua abad ini (> 2050)	Paris Agreement, UNFCCC 2015

3.2 Pengembangan Model SPE Nasional

Model SPE yang dikembangkan berdasarkan empat tujuan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.1, pemetaan area keterkaitan tujuan beserta indikatornya antara tujuan satu dengan lainnya dapat diilustrasikan melalui Gambar 3.2.

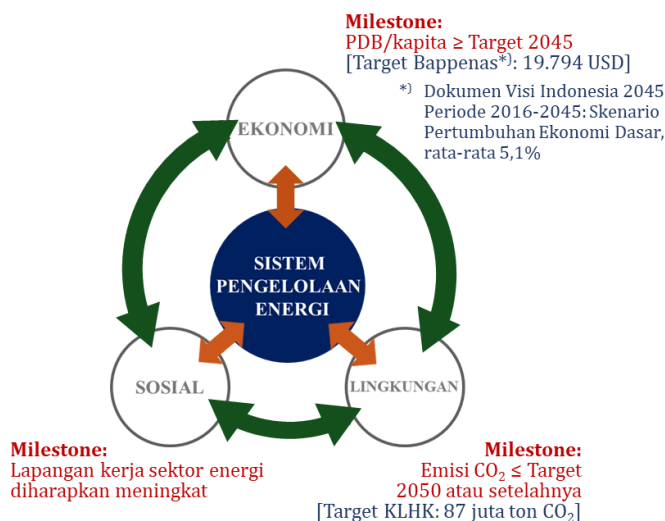


Catatan:

Area skematik tidak menggambarkan proporsionalitas besar/level pentingnya indikator dari masing-masing tujuan

Gambar 3.2 Pemetaan area keterkaitan tujuan beserta indikatornya pada model SPE (Hutrinindo, 2022)

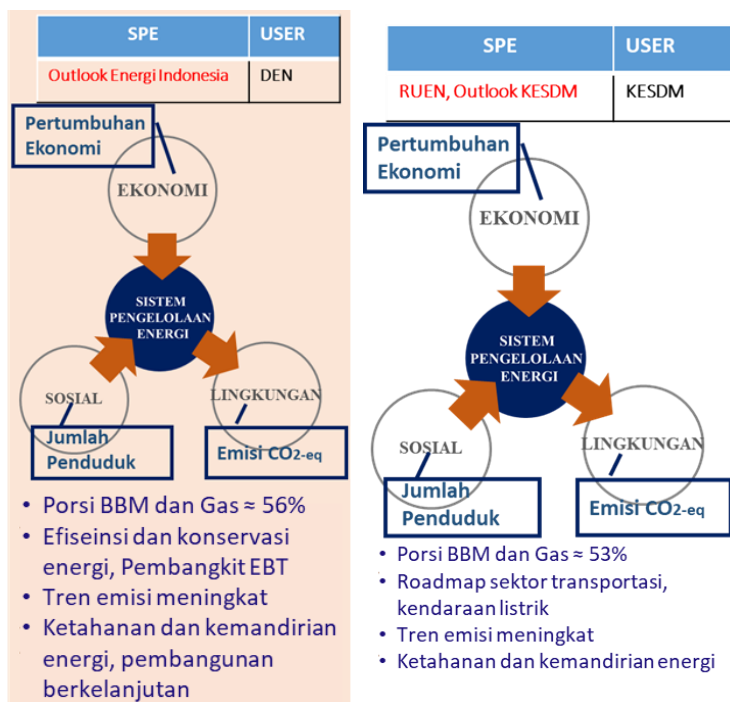
Dari pemetaan keterkaitan tujuan pada model SPE yang dikembangkan tersebut, indikator Kesepakatan Paris, yaitu emisi Gas Rumah Kaca (GRK) berada paling dalam yang dilingkupi seluruh tujuan dalam model, sedangkan Tujuan Pengembangan Berkelanjutan menjadi pelingkup seluruh tujuan. Maka, lingkup besar pada Gambar 3.2 itulah penggambaran Model Sistem Pengelolaan Energi (SPE) Nasional yang dikembangkan. Hubungan interaksi SPE dengan aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan pada model ini diilustrasikan melalui Gambar 3.3.



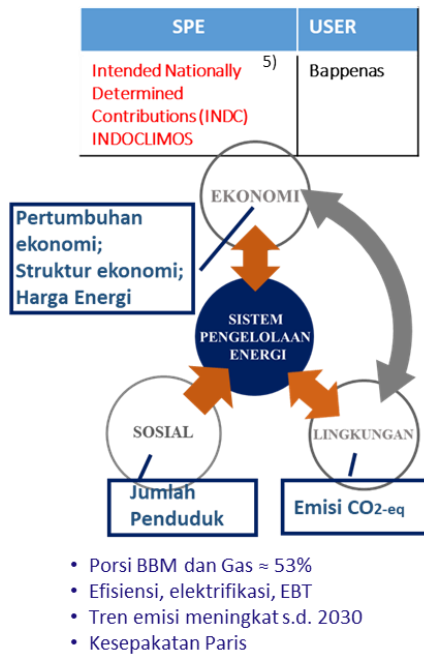
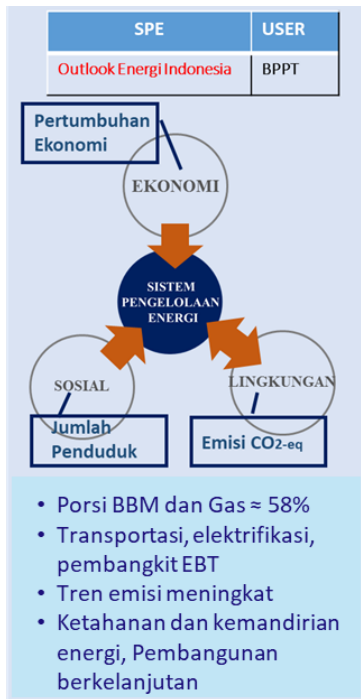
Gambar 3.3 Ilustrasi interaksi Model SPE dengan tiga aspek utama (Hutrinindo, 2022)

Model SPE yang dikembangkan memperhitungkan hubungan timbal balik penuh antara SPE dengan ketiga aspek utama (ekonomi, sosial, dan lingkungan) dan juga memperhitungkan hubungan timbal balik penuh antara tiga aspek utama di luar SPE, sehingga parameter yang diikutsertakan lengkap, tetapi model ini agak berat proses perhitungannya. Khusus untuk target sesuai dengan empat tujuan di atas, ditentukan *milestone* untuk ketiga aspek utama agar bisa tercapai pada saatnya. *Milestone* untuk aspek ekonomi adalah PDB/kapita $\geq$ Target 2045, *milestone* untuk aspek lingkungan adalah emisi CO₂ $\leq$ Target 2050 atau sesudahnya, dan *milestone* untuk aspek sosial adalah bahwa lapangan kerja sektor energi diharapkan meningkat.

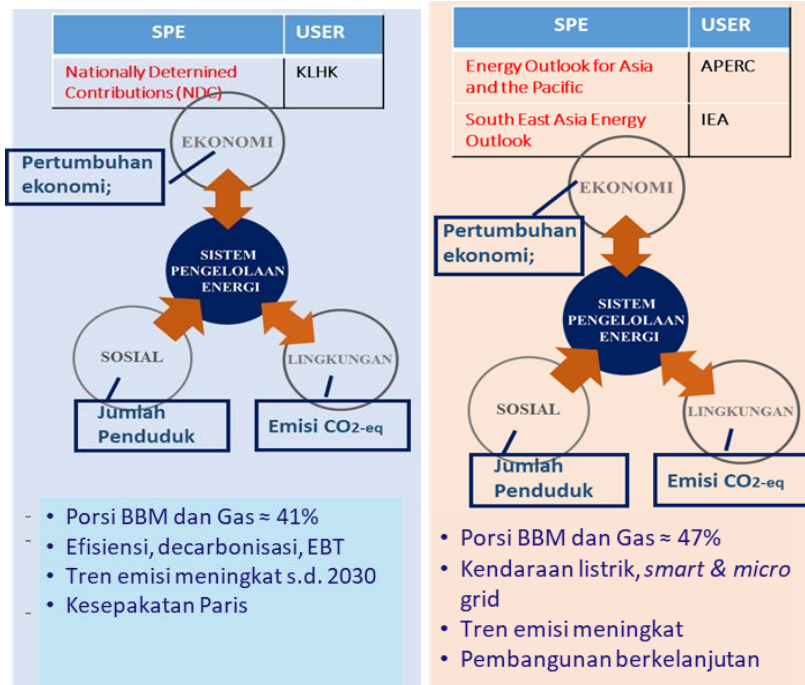
Untuk perbandingan antara model SPE yang dikembangkan dengan model-model SPE yang ada, disajikan beberapa konsep model SPE yang telah dipergunakan oleh beberapa instansi pemerintah maupun instansi independen pada Gambar 3.4–Gambar 3.6.



Gambar 3.4 Model SPE yang dipergunakan DEN (kiri) dan KESDM (kanan) (Hutrindo, 2022)



Gambar 3.5 Model SPE yang dipergunakan BPPT (kiri) dan Bappenas (kanan) (Hutrindo, 2022)



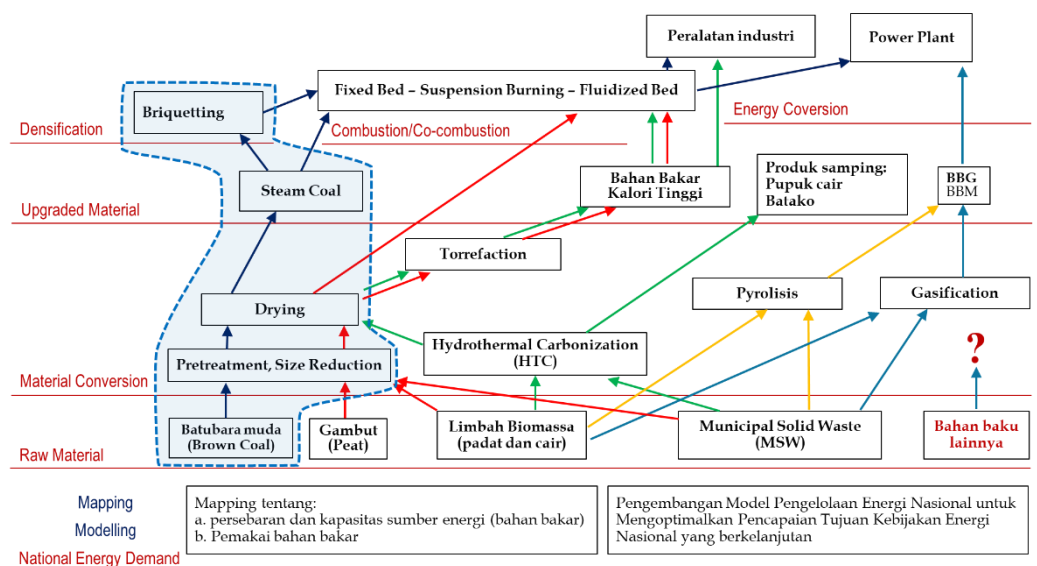
Gambar 3.6 Model SPE yang dipergunakan KLHK (kiri) dan APERC - IEA (kanan) (Hutrindo, 2022)

Gambar 3.4–Gambar 3.6 menunjukkan bahwa model SPE yang secara fungsional sudah dipakai banyak instansi untuk memprediksi permintaan dan penyediaan energi pada umumnya lebih sederhana dibandingkan dengan model SPE yang dikembangkan. Hal ini wajar sesuai dengan kebutuhan dan tujuan prediksi permintaan dan penyediaan energi sesuai dengan keperluan instansi yang bersangkutan.

Demikian pengembangan model SPE yang dilakukan penulis dan tim. Topik ini juga menjadi topik disertasi mahasiswa doktoral Erick Hutrindo NIM 33115001 pada Prodi S-3 Teknik Mesin ITB di bawah bimbingan Dr. Ir. Toto Hardianto DEA sebagai promotor yang dibantu oleh Dr. Eng. Pandji Prawisudha, S.T., M.T., dan Dr. Ir. Retno Gumilang Dewi, M.Env.Eng.Sc. Sebagai kopromotor, selesai pada Desember 2022.

4 PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PENINGKATAN KUALITAS BATUBARA (COAL UPGRADING TECHNOLOGY, CUT) DAN PEMBANGUNAN PABRIK PERCOBAANNYA

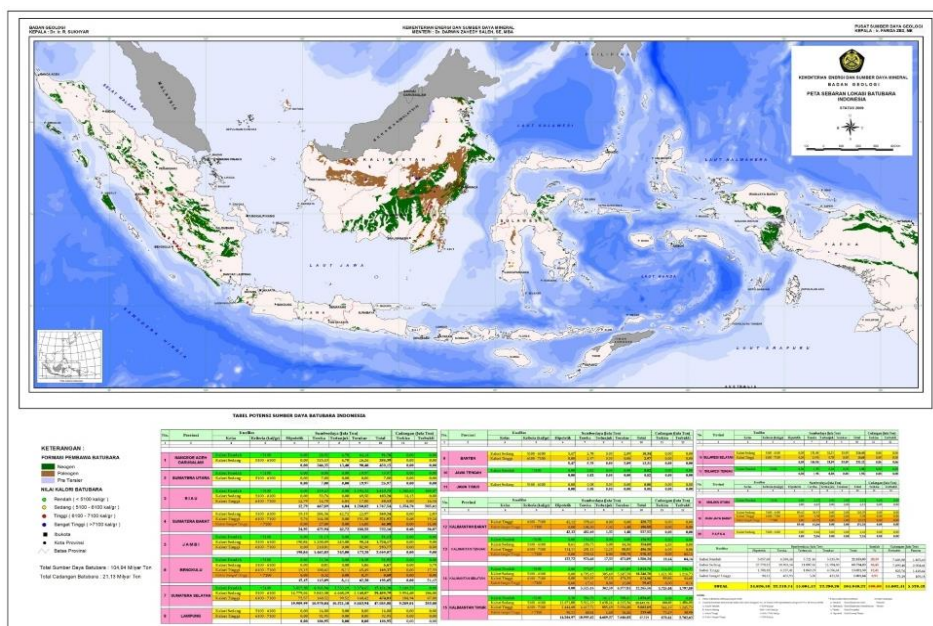
Pengembangan teknologi peningkatan kualitas batubara dalam hal ini merupakan bagian dari peta jalan umum dalam Gambar 2.1, yaitu bagian pemrosesan batubara yang ditunjukkan melalui Gambar 4.1 pada bagian yang diarsir biru. Penelitian dan pengembangan teknologi pemanfaatan batubara sebagai bahan bakar ini dimulai pada tahun 1996 dengan beberapa alternatif metode, di antaranya metode campuran batubara air (*coal water mixture*), metode campuran batubara dan biomassa, dan metode peningkatan kualitas batubara melalui pengeringan dan menjaga tetap kering. Peningkatan kualitas batubara ini sudah sampai pada pembangunan pabrik percobaan (*Pilot Plant*) pada kurun tahun 2006–2012, atas kolaborasi dengan mitra PT Pamapersada Nusantara yang telah memfasilitasi dan membiayai pembangunan pabrik percobaan tersebut.



Gambar 4.1 Peta jalan pengembangan bahan bakar alternatif bagian **batubara**

4.1 Sumberdaya Batubara Indonesia

Menurut data dari *Outlook Energi Indonesia 2023* [1], Indonesia mempunyai cadangan batubara terbukti sebesar 35 miliar ton, dari total seluruh cadangan 99 miliar ton. Cadangan tersebut tersebar di seluruh wilayah Indonesia, terutama di pulau Sumatra, Kalimantan, dan Irian. Data sebaran sumberdaya batubara Indonesia ditunjukkan melalui peta Gambar 4.2. Dari jumlah tersebut, sebanyak 70% didominasi oleh batubara kualitas/peringkat rendah, yaitu kelas Lignite dan Subbituminous, dengan ciri-ciri kandungan air (*Moisture Content*, MC) yang tinggi (*typical* 34%) dan nilai kalor yang rendah, yaitu di bawah 5.000 kcal/kg.



Sumber: Badan geologi Kementerian ESDM

Gambar 4.2 Sebaran sumberdaya batubara Indonesia

Untuk mencapai kelayakan sebagai bahan bakar padat yang bisa dipakai pada tungku bahan bakar padat jenis *suspension burning* dan jenis *fluidized bed* yang umumnya berkapasitas besar, maka batubara kualitas rendah harus dinaikkan ke kelas bituminous atau setidaknya di kelas Subbituminous A. Maka pada pengembangan batubara ini dilakukan peningkatan kualitas batubara melalui metode yang merupakan gagasan asli dari tim penulis dan diberi nama ***Coal Upgrading Technology (CUT)***.

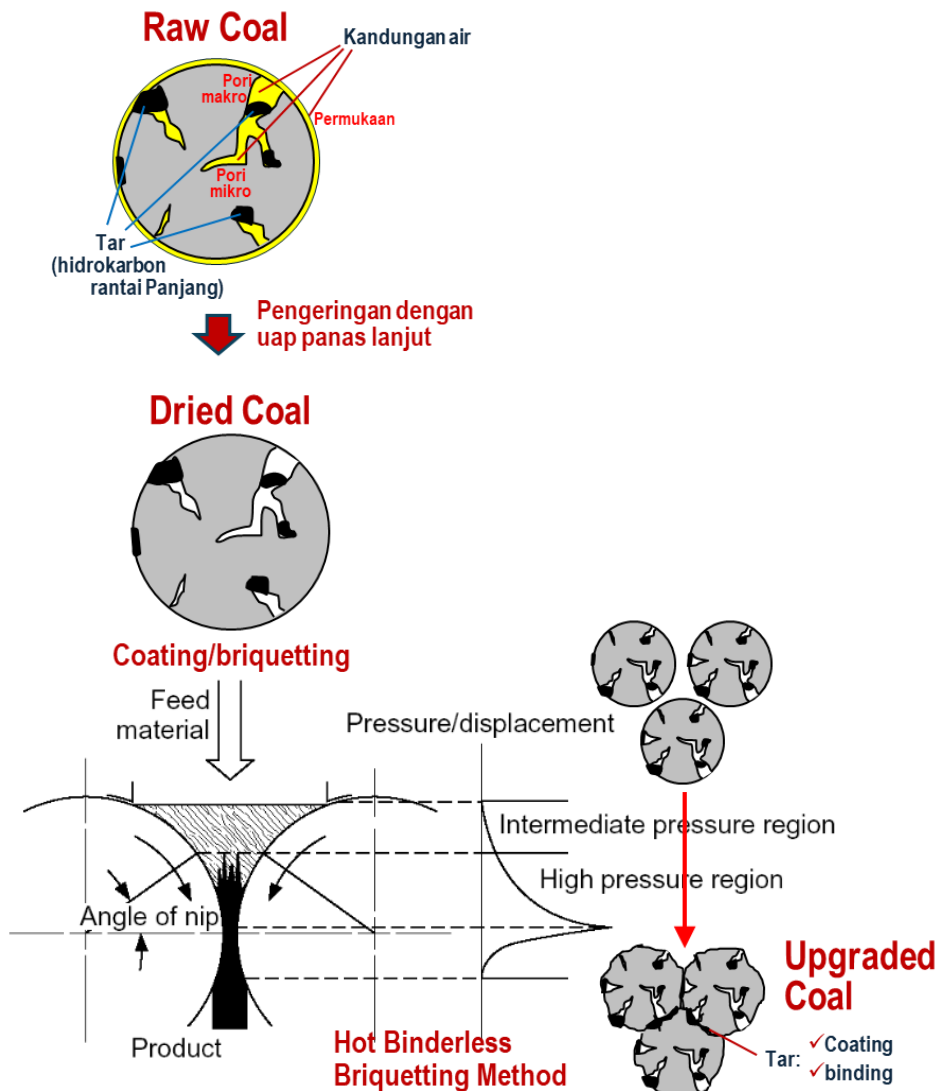
4.2 Metode Peningkatan Kualitas Batubara Versi CUT

Hasil analisis proximate terhadap batubara secara umum menunjukkan bahwa komponen utama batubara terdiri atas *fixed carbon*, *volatile matter*, kandungan air, dan abu. Dari keempat komponen tersebut, hanya *fixed carbon* dan *volatile matter* yang menghasilkan kalor (energi panas) pada reaksi pembakarannya, sedangkan kandungan air justru menyerap kalor yang dihasilkan dari pembakaran batubara untuk keperluan penguapannya. Demikian juga abu, walaupun tidak sebanyak air penyerapan kalornya. Oleh karena itu, ide dasar peningkatan kualitas batubara peringkat rendah dalam arti menaikkan nilai kalor adalah dengan mengurangi atau bahkan mengeliminasi kandungan air dengan cara dikeringkan (*drying*), sehingga kandungan hasil pengeringan didominasi oleh komponen yang menghasilkan kalor bila terbakar dan nilai kalor akan naik secara signifikan. Ada dua permasalahan tentang pengeringan batubara ini:

- ✓ Yang pertama, yaitu bahwa pengeringan harus dilakukan melalui media gas bertemperatur “hangat” tanpa adanya oksigen; sebab bila ada oksigen, maka yang terjadi adalah pembakaran, sedangkan udara mengandung oksigen, jadi harus menggunakan media gas yang inert.
- ✓ Yang kedua adalah bahwa batubara peringkat rendah memang senang menyerap air, sehingga kandungan airnya cukup tinggi. Jadi bila batubara peringkat rendah yang sudah dikeringkan disimpan di tempat penampungan batubara (*coal yard*), maka dia akan menyerap kembali uap air dari udara.

Solusi dalam hal pengeringan batubara di atas adalah menggunakan uap panas lanjut sebagai media pengering, pada temperatur yang cukup tinggi ($\approx 230\text{ }^{\circ}\text{C}$) atau istilah awamnya adalah uap kering. Selanjutnya untuk solusi menjaga tetap kering, idenya adalah dengan menggunakan sifat salah satu komponen batubara yang hidrofobik (sifat anti menyerap air), yaitu komponen *volatile matter* berat (rantai HC panjang), yang akan difungsikan sebagai pelapis (*coating*) butir melalui pembriketan panas. Secara global proses pengeringan batubara dari awal adalah bahwa batubara digerus (*grinding*) terlebih dahulu menjadi butir-butir kecil, kemudian dikeringkan dengan uap panas lanjut agar kandungan airnya lepas dan komponen *volatile matter* beratnya mengalami *softening*, lalu langsung dibriket dalam keadaan panas, dalam hal ini *volatile matter* berat akan “mecotot” keluar dari butir karena tertekan sehingga

menjadi pelapis (*coating*) butir tersebut dan sekaligus sebagai perekat (*binder*) terhadap butir yang lain. Ilustrasi prosesnya ditunjukkan melalui Gambar 4.3.



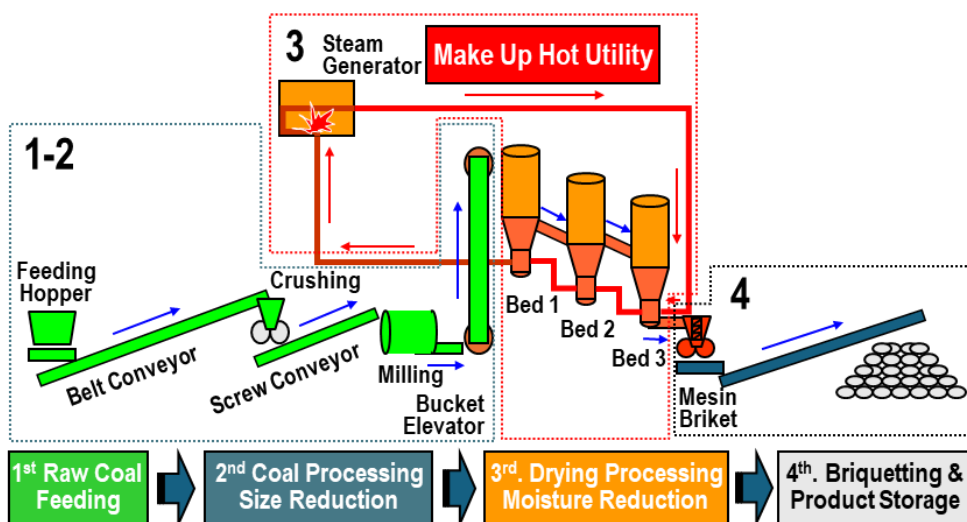
Gambar 4.3 Proses pengeringan dan pembriketan metode CUT

4.3 Pabrik Percobaan (*Pilot Plant*) Peningkatan Kualitas Batubara dengan Metode CUT

Pabrik percobaan peningkatan kualitas batubara dengan metode CUT telah dibangun dengan kapasitas 7 ton/jam, atau sekitar 5.000 ton/bulan, dengan tujuan sebagai pembuktian lapangan dari ide di laboratorium ke skala

komersial besar 150 ton/jam untuk mengenali segala kemungkinan permasalahannya. Di samping itu, skala pabrik percobaan diharapkan bisa memproduksi batubara peringkat tinggi sebanyak satu tongkang kecil dalam sebulan, untuk kegiatan tingkat koperasi kecil.

Diagram alir proses (*Process Flow Diagram*, PFD) secara blok dari pabrik percobaan terdiri atas 4 blok, yaitu *Raw Coal Feeding*, *Coal Processing Size Reduction*, *Drying Processing-Moisture Reduction*, dan *Briquetting & Product Storage* ditunjukkan melalui Gambar 4.4. Pabrik ini dilengkapi juga dengan *steam generator* untuk membuat uap panas lanjut sebagai fluida media pengering di Bed 2 dan Bed 3.

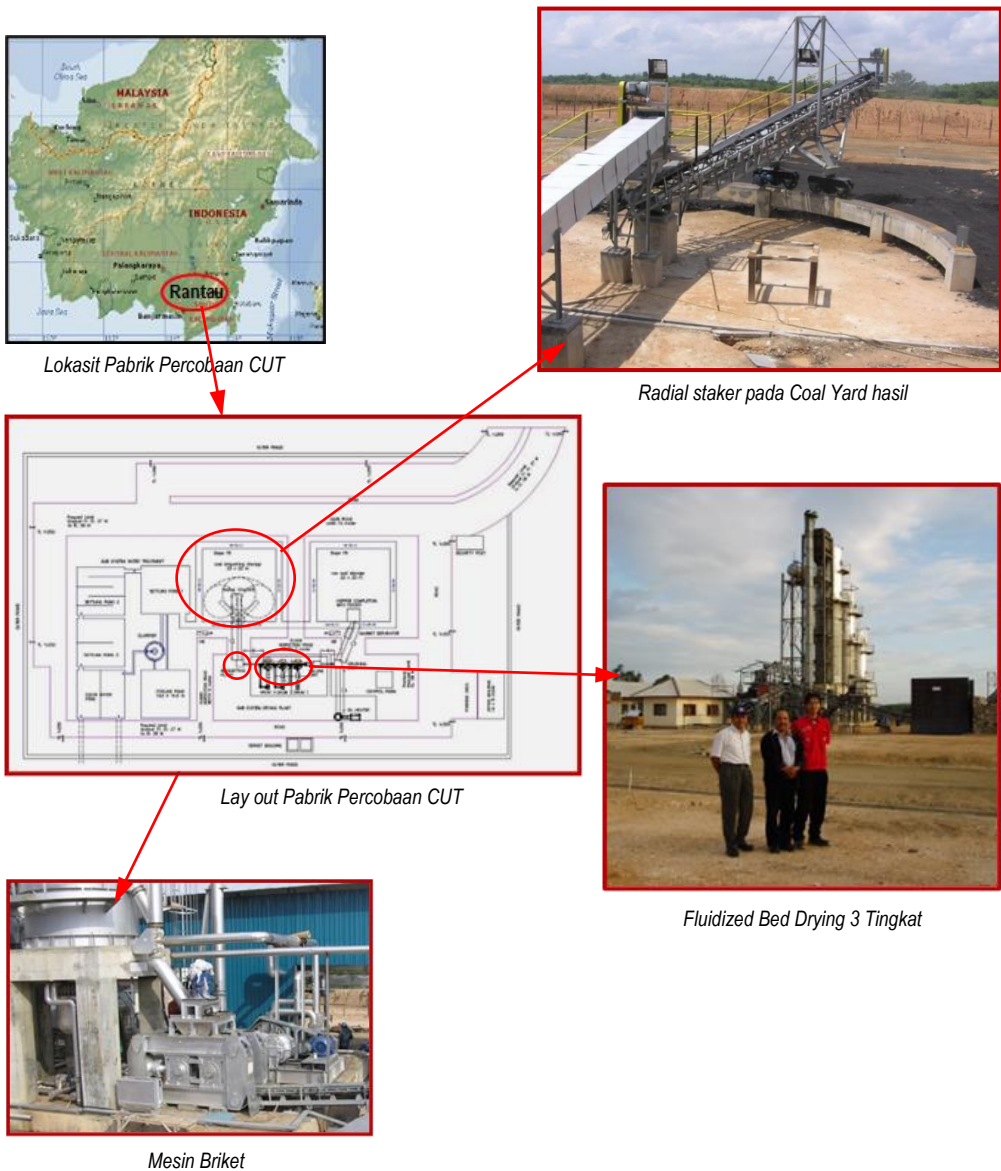


Gambar 4.4 Diagram alir proses dalam bentuk blok dari pabrik percobaan kapasitas 7 ton/jam

Proses pengeringan menggunakan prinsip pengeringan unggun terfluidisasi (*fluidized bed drying*) bertingkat tiga masing masing pada temperatur 80 °C untuk Bed 1 menggunakan media udara, 145 °C untuk Bed 2 menggunakan media uap panas lanjut, dan 239 °C untuk Bed 3 juga uap panas lanjut. Strategi ini diperlukan untuk memaksimalkan pemakaian kalor agar tidak banyak terbuang.

Pembangunan pabrik percobaan direalisasikan di Kota Rantau, Kabupaten Tapin, Kalimantan Selatan. Pembangunan atas biaya dari PT Pamapersada Nusantara sebagai mitra ITB yang berkeinginan untuk mengaplikasikan hasil penelitian ITB. Lokasi, tempat ini berdekatan dengan tambang batubara

kualitas rendah. Lokasi dan *lay out* pabrik percobaan peningkatan kualitas batubara ditunjukkan melalui Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Lokasi dan *lay out* pabrik percobaan kapasitas 7 ton/jam

Hasil dari peningkatan kualitas batubara melalui metode pengeringan dan pembriketan panas (metode CUT) ditunjukkan melalui Tabel 4.1. Tingkat keadaan awal batubara ditunjukkan pada kolom Bahan Baku dengan kandungan air 34,62% dan nilai kalor 4.289 kcal/kg. Setelah digerus (*grinding*)

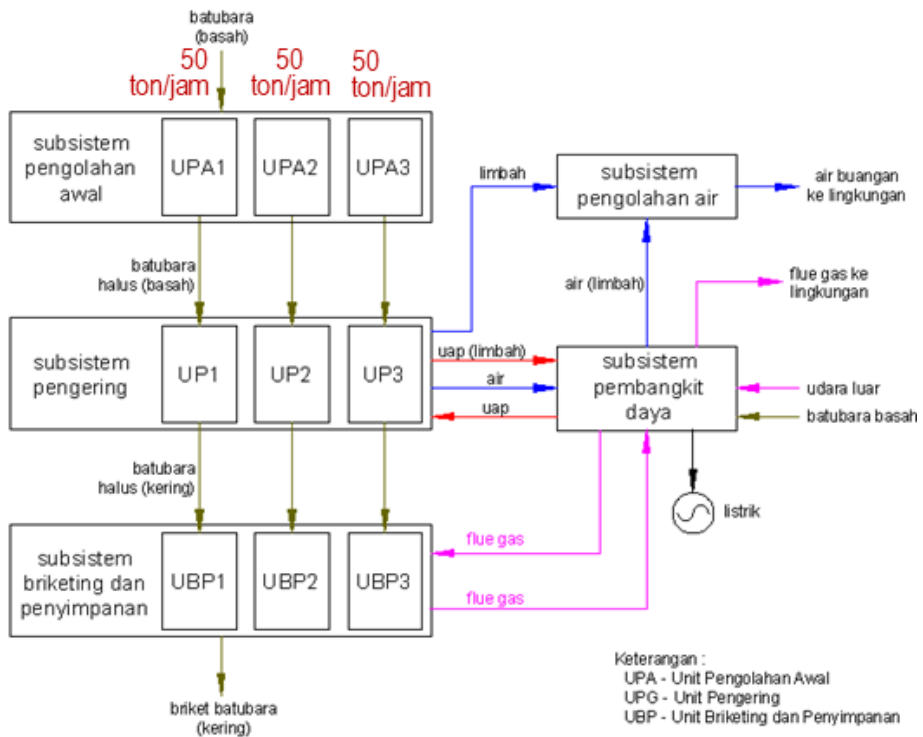
sebagai persiapan untuk pengeringan dan pembriketan, batubara mengalami sedikit perubahan keadaan. Hasil dari proses peningkatan kualitas ditunjukkan pada kolom Batubara Hasil dengan kandungan air tinggal 1,19% dan nilai kalor naik menjadi 6.740 kcal/kg.

Tabel 4.1 Perbandingan karakter batubara antara bahan baku dan hasil CUT

Analisis Proksimat	Bahan Baku	Setelah Grinding	Batubara Hasil
Total moisture %	34,62	29,41	1,19
Inherent moisture % adb	22,52	22,52	1,19
Ash content % adb	4,30	0,83	1,30
Volatile matter % adb	39,02	31,98	43,77
Fix Carbon % adb	34,16	37,78	53,74
Total Sulfur % adb	0,15	0,15	0,15
Size	99,40	-20/42 mesh	-20/42 mesh
Nilai kalor kcal/kg	4.289	4.420	6.740

4.4 Rencana Pengembangan Menuju Aplikasi Skala Komersial

Hasil pembangunan dan uji peningkatan kualitas batubara pada tingkat pabrik percobaan telah ditindak lanjuti dengan merancang secara konsep (*concept design*) pabrik pada skala komersial. Pada skala ini, kapasitas produksi batubara hasil dirancang sebesar 150 ton/jam, yang terdiri atas tiga jalur proses pengeringan dan pembriketan yang masing-masing berkapasitas 50 ton/jam. Kapasitas ini sanggup menghasilkan batubara peringkat tinggi sekitar satu juta ton per tahun, suatu tingkatan jumlah batubara kualitas tinggi yang cukup untuk memenuhi kebutuhan konsumsi batubara pada PLTU berkapasitas 100 MW. Rancangan konsep pabrik skala komersial ditunjukkan melalui Gambar 4.6.

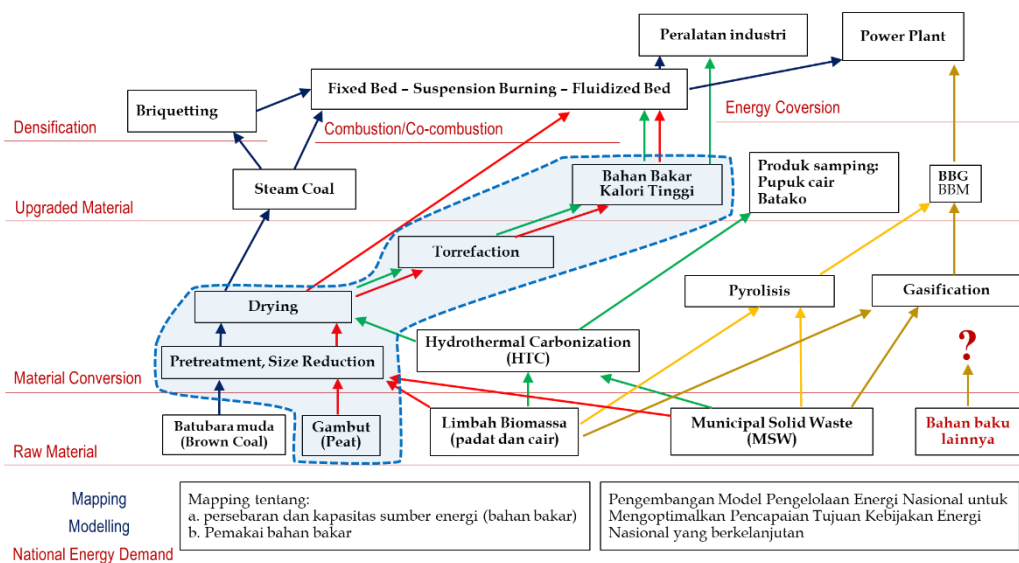


Gambar 4.6 Konsep perancangan pabrik skala komersial kapasitas 150 ton/jam

Pabrik skala komersial ini menunggu peminat yang ingin menerapkan hasil pengembangan penulis dan tim.

5 PENGEMBANGAN TEKNOLOGI KONVERSI GAMBUT MENJADI BAHAN BAKAR PADAT SETARA BATUBARA MELALUI PROSES TOREFAKSI

Pengembangan teknologi konversi gambut menjadi bahan bakar padat dalam hal ini merupakan bagian dari peta jalan umum Gambar 2.1, yaitu bagian pemrosesan gambut yang ditunjukkan melalui Gambar 5.1 pada bagian yang diarsir biru. Penelitian dan pengembangan teknologi konversi gambut sebagai bahan bakar ini dimulai pada tahun 2006 dengan metode pengeringan dan torefaksi.



Gambar 5.1 Peta Jalan Pengembangan Bahan Bakar Alternatif Bagian Gambut

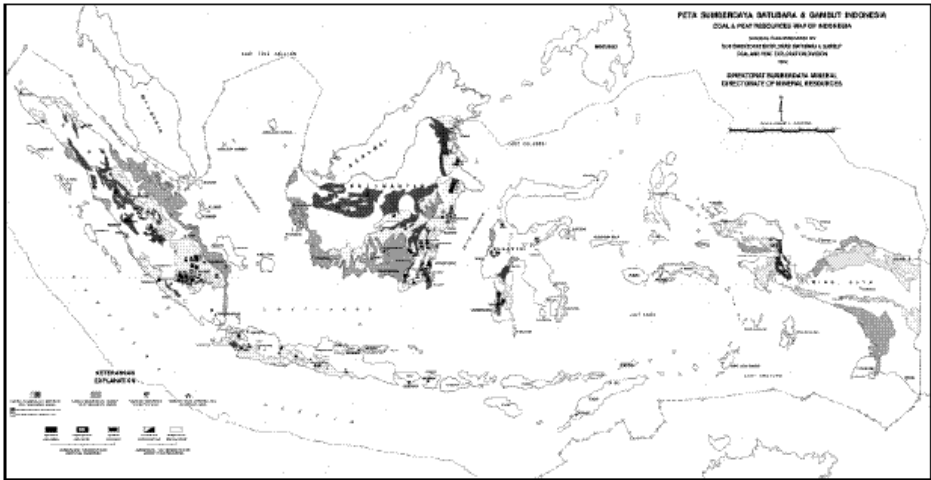
5.1 Pengantar: Energi Baru dari Lahan Basah Indonesia

Indonesia memiliki cadangan gambut seluas 27 juta hektar, menjadikannya negara dengan luasan gambut terbesar ketiga di dunia setelah Kanada dan Rusia, ditunjukkan di Tabel 5.1. Sebaran gambut di wilayah Indonesia ditunjukkan melalui peta Gambar 5.2. Sebagai bentuk biomassa yang terbentuk dari pelapukan material organik di lingkungan anaerob, gambut menyimpan potensi energi yang belum banyak dimanfaatkan. Nilai kalor alaminya hanya sekitar 2.500 kcal/kg, jauh di bawah batubara subbituminous. Namun, dengan pendekatan termal tertentu, terutama proses torefaksi, nilai

kalor gambut dapat ditingkatkan menjadi setara dengan batubara kelas industri.

Tabel 5.1 Cadangan gambut empat negara terbesar di dunia

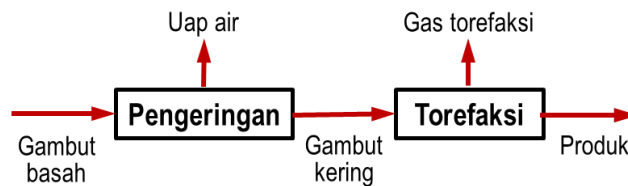
Canada	111.328.000 Ha
Russia	56.800.000 Ha
Indonesia	27.000.000 Ha
USA	21.400.000 Ha



Sumber: Badan geologi Kementerian ESDM

Gambar 5.2 Sebaran sumberdaya gambut Indonesia

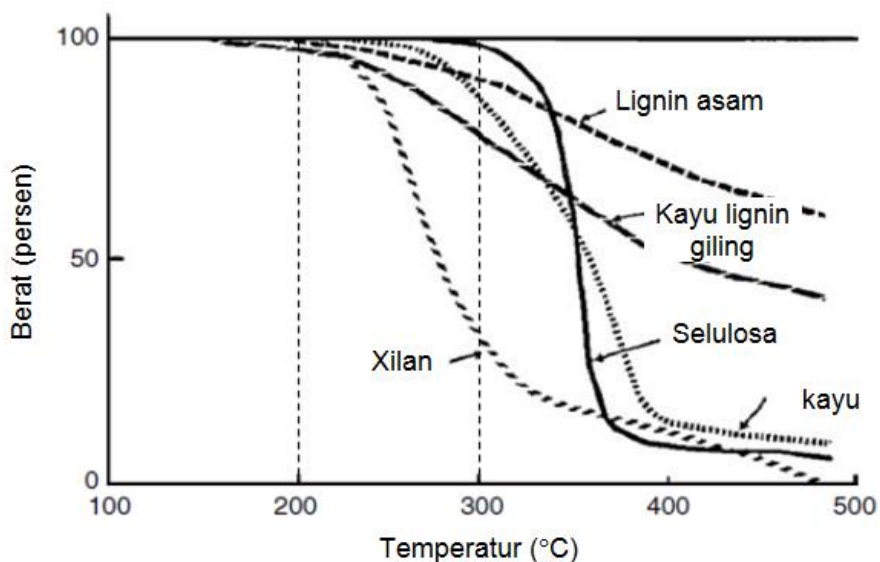
Secara kimia, gambut terdiri atas lignin, selulosa, hemiselulosa, dan zat kontaminan lain. Struktur kimianya kompleks dan cenderung memiliki kadar air tinggi, bahkan mencapai 50%. Tantangan utama dalam pemanfaatan gambut sebagai bahan bakar adalah rendahnya nilai kalor dan tingginya kandungan air. Oleh karena itu, diperlukan dua langkah utama untuk mengonversinya menjadi bahan bakar padat: (1) pengeringan dan (2) torefaksi. Gambar 5.3 menampilkan alur proses dari gambut basah ke produk torefaksi, melalui dua tahap utama yaitu pengeringan dan torefaksi, dengan keluaran berupa gas torefaksi, uap air, dan produk padatan berkadar nilai kalor yang tinggi.



Gambar 5.3 Diagram proses pengeringan dan torefaksi gambut

Pengeringan dilakukan untuk menghilangkan air bebas pada temperatur mendekati 100 °C, sedangkan torefaksi adalah proses pemanasan tanpa oksigen pada temperatur sekitar 280–340 °C selama 30–60 menit. Pada tahap ini, terjadi dekomposisi sebagian ikatan kimia kompleks dalam biomassa, terutama hemiselulosa, yang kemudian meningkatkan kandungan karbon dan nilai kalor produk.

Proses dekomposisi terdiri atas zona temperatur dekomposisi dari hemiselulosa (225–325 °C), selulosa (305–375 °C), dan lignin (250–500 °C), sebagaimana ditampilkan melalui Gambar 5.4.



Gambar 5.4 Dekomposisi Lignoselulosa pada proses pemanasan (Bergman, 2004)

Hemiselulosa merupakan komponen paling reaktif yang mulai terdegradasi pada temperatur yang relatif rendah, menjadikannya target utama dalam proses torefaksi. Selulosa memerlukan temperatur lebih tinggi untuk mulai terdekomposisi, sementara lignin, meskipun mulai berubah pada

temperatur rendah, membutuhkan rentang temperatur yang tinggi untuk degradasi total. Proses torefaksi pada gambut secara strategis diarahkan pada zona temperatur yang dapat mengoptimalkan pelepasan *volatile matter* dari hemiselulosa dan sebagian lignin tanpa menghilangkan kandungan karbon tetap (*fixed carbon*), sehingga produk menjadi lebih kering, padat, dan bernilai kalor tinggi.

5.2 Metodologi Penelitian: Dari Lab ke Skala Industri

Untuk membuktikan dan mengimplementasikan konsep peningkatan nilai kalor gambut melalui proses torefaksi, dilakukan serangkaian kegiatan penelitian yang sistematis, dimulai dari kajian literatur, eksperimen skala laboratorium, pengembangan model, hingga desain sistem skala industri kecil. Secara umum, pendekatan metodologis ini terbagi menjadi dua tahap utama:

- Eksperimen torefaksi batch untuk mengidentifikasi parameter optimum.
- Pengembangan sistem torefaksi kontinu untuk skala industri kecil.

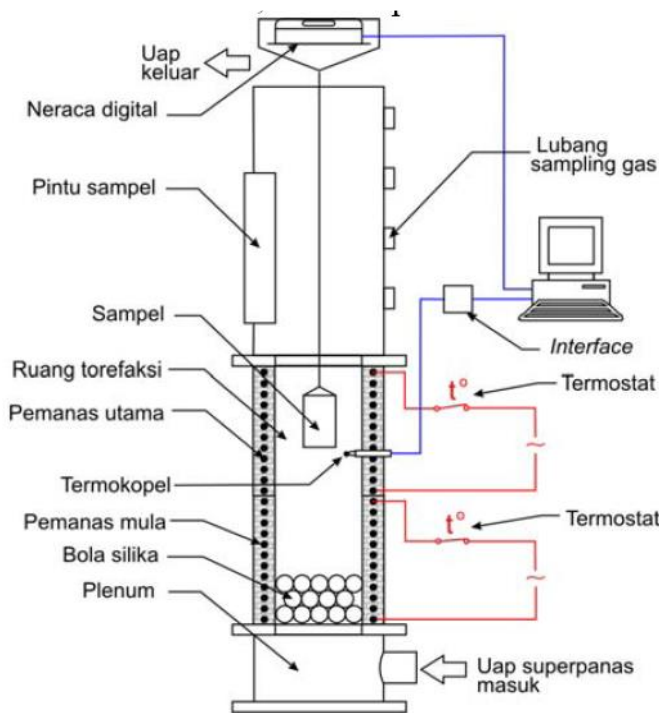
5.2.1 Eksperimen Batch

Eksperimen dilakukan pada temperatur 280–340°C dan waktu tinggal 600–3600 detik (10–60 menit). Sampel gambut diletakkan di dalam reaktor *batch* dan dipanaskan secara isothermal menggunakan pemanas listrik, dengan injeksi uap superpanas untuk menciptakan lingkungan inert. Selama proses, penurunan massa sampel dimonitor secara kontinu dengan timbangan digital, dan hasilnya kemudian dianalisis secara visual, proksimat, ultimat, serta pengukuran nilai kalor.

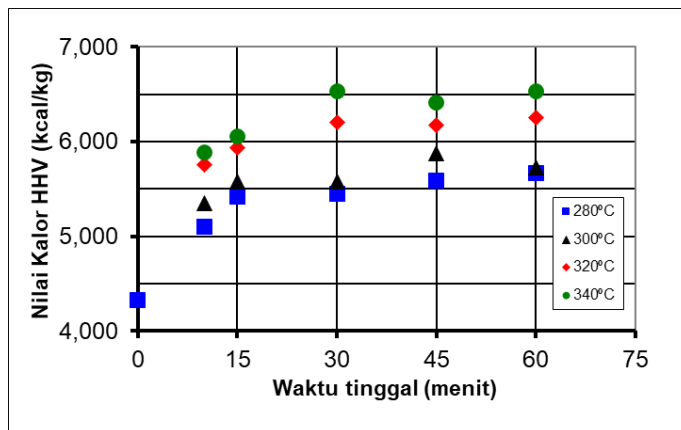
Beberapa hasil utama dari eksperimen batch skala laboratorium adalah:

- Nilai kalor meningkat dari 2.500 kcal/kg menjadi sekitar 6.000 kcal/kg (≈ 25 MJ/kg), setara dengan batubara bituminus C.
- Penurunan rasio O/C dan H/C produk torefaksi menunjukkan proses pembatubaraan (*coalification*) telah terjadi.
- Parameter optimum: temperatur 300 °C dan waktu tinggal 1800 detik (30 menit).

Gambar 5.5 memperlihatkan skematik dan foto alat eksperimen *batch*, sedangkan Gambar 5.6 menunjukkan tren peningkatan HHV produk pada berbagai kombinasi temperatur dan waktu tinggal.



Gambar 5.5 Skematik dan alat eksperimen *Batch* (Haryadi, 2006)



Gambar 5.6 Nilai Kalor produk torefaksi gambut pada berbagai waktu dan temperatur (Haryadi, 2006)

5.2.2 Sistem Torefaksi Kontinu Skala Industri

Setelah parameter optimum dan model reaksi diperoleh, tahap selanjutnya adalah mengembangkan sistem reaktor yang dapat beroperasi secara kontinu untuk memproses gambut dalam skala yang lebih besar. Sistem ini terdiri atas dua tahap utama:

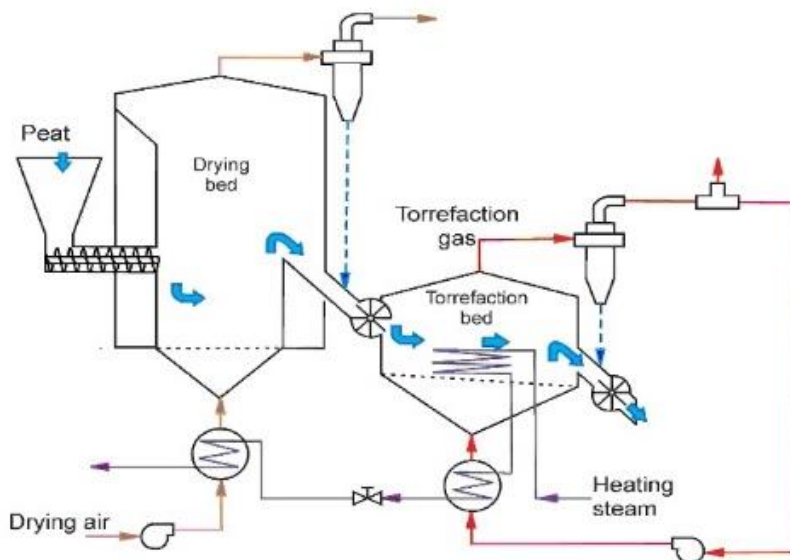
- Unggun pengering: berfungsi untuk mengurangi kadar air awal gambut hingga mencapai tingkat optimum.
- Unggun torefaksi: digunakan untuk melakukan pirolisis ringan dalam kondisi inert, menghasilkan padatan berenergi tinggi.

Kedua bagian sistem menggunakan teknologi unggun terfluidisasi untuk menjamin distribusi panas yang merata serta pergerakan material yang stabil. Model skala laboratorium telah dikembangkan dan diuji, yang kemudian dijadikan dasar untuk merancang sistem skala industri kecil dengan kapasitas 2,5 ton/jam (gambut basah dengan MC 50%).

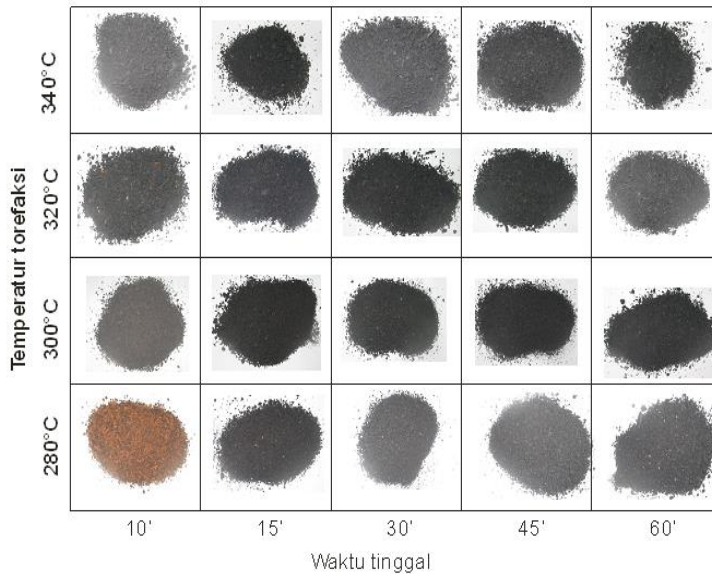
Hasil pengujian menunjukkan:

- Produksi 797 kg/jam gambut torefaksi dengan HHV ~23,7 MJ/kg
- Energi proses dioptimalkan dengan resirkulasi gas buang dan kondensat.

Diagram blok sistem torefaksi kontinu dan foto produk hasil uji coba sistem ditampilkan secara berturut turut pada Gambar 5.7 dan Gambar 5.8.

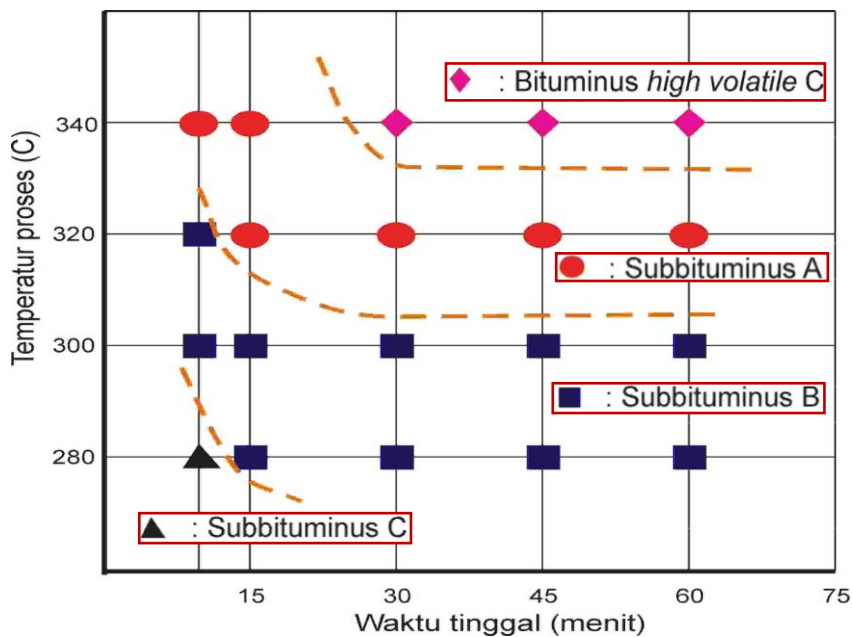


Gambar 5.7 Diagram blok sistem torefaksi kontinu (Haryadi, 2006)



Gambar 5.8 Foto hasil torefaksi pada berbagai temperatur dan waktu tinggal (Haryadi, 2006)

Nilai kalor hasil torefaksi gambut Gambar 5.6 bila diplot terhadap temperatur dan waktu tinggal pada proses torefaksi, akan menggambarkan kesetaraan hasil torefaksi terhadap peringkat batubara, disajikan melalui Gambar 5.9.



Gambar 5.9 Kesetaraan hasil torefaksi dengan peringkat batubara (Haryadi, 2006)

5.3 Signifikansi Inovasi: Akselerasi “Pembatubaraan”

Salah satu pencapaian penting dari penelitian ini adalah kemampuannya dalam mempercepat proses pembentukan batubara secara artifisial, atau yang dikenal sebagai proses pembatubaraan (*coalification*). Dalam kondisi alami, transformasi gambut menjadi batubara memerlukan waktu ratusan hingga jutaan tahun akibat tekanan geologis dan temperatur yang berlangsung secara perlahan. Melalui pendekatan termokimia berupa torefaksi pada temperatur menengah (sekitar 300 °C) dalam lingkungan inert, proses tersebut dapat disimulasikan dan dipercepat hanya dalam waktu sekitar 30 menit. Ini memberikan kontribusi nyata dalam menciptakan bahan bakar padat yang lebih bersih dan berdaya guna tinggi dari sumber daya lokal yang sebelumnya kurang dimanfaatkan.

Inovasi teknologi ini tidak hanya berhenti pada percepatan proses, tetapi juga menghasilkan produk dengan karakteristik unggul dibandingkan gambut mentah:

- Lebih ringan dan lebih kering: Proses torefaksi mengurangi kadar air secara signifikan, sehingga menurunkan bobot dan meningkatkan kemudahan transportasi serta penanganan material.
- Lebih homogen: Produk torefaksi memiliki ukuran, bentuk, dan kandungan kimia yang lebih seragam, menjadikannya lebih stabil dan konsisten saat digunakan dalam sistem pembakaran maupun gasifikasi.
- Mudah dibentuk ulang: Produk hasil torefaksi dapat dikompaksi menjadi bentuk briket, pellet, atau bentuk lainnya, memungkinkan adaptasi untuk berbagai segmen pengguna—dari industri besar hingga rumah tangga.
- Peningkatan nilai kalor dan efisiensi pembakaran: Dengan rasio O/C dan H/C yang lebih rendah, produk hasil torefaksi lebih menyerupai batubara dalam performa pembakarannya, menghasilkan energi lebih tinggi per satuan massa.
- Lebih ramah lingkungan: Produk torefaksi mengandung lebih sedikit zat volatil dan kelembapan, yang berarti emisi saat pembakaran dapat ditekan dibandingkan dengan gambut atau biomassa mentah.

Keunggulan-keunggulan ini menjadikan torefaksi sebagai teknologi konversi energi berbasis biomassa yang menjanjikan, terutama untuk negara-negara dengan sumber daya gambut yang besar seperti Indonesia. Dalam konteks transisi energi dan desentralisasi sumber energi lokal, penerapan

teknologi ini memiliki potensi strategis untuk mengurangi ketergantungan pada batubara fosil serta meningkatkan ketahanan energi daerah.

Sebagai pengakuan atas nilai kebaruan dan aplikasinya, inovasi proses ini telah memperoleh paten nasional dengan nomor IDP000058703. Paten ini diberikan atas nama Dr. Toto Hardianto, Ir. Haryadi, dan Prof. Aryadi Suwono, berlaku sejak 3 Februari 2010 hingga 3 Februari 2030. Perlindungan paten tersebut menegaskan bahwa hasil penelitian ini tidak hanya memiliki kontribusi akademik, tetapi juga relevansi komersial dan potensi implementasi dalam skala luas di industri energi alternatif Indonesia.

5.4 Catatan Penutup dari Pengembangan Gambut

Studi ini secara komprehensif menunjukkan bahwa proses torefaksi dapat menjadi teknologi kunci dalam konversi gambut menjadi bahan bakar padat berkualitas tinggi. Selain peningkatan nilai kalor, proses torefaksi juga menghasilkan bahan bakar yang lebih stabil, lebih ringan, dan memiliki performa pembakaran yang lebih efisien. Hal ini membuktikan bahwa gambut, yang selama ini dianggap sebagai biomassa marjinal, sesungguhnya memiliki potensi energi besar jika dikelola dengan pendekatan teknologi yang tepat.

Dari sisi ilmiah dan akademik, penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dalam beberapa aspek:

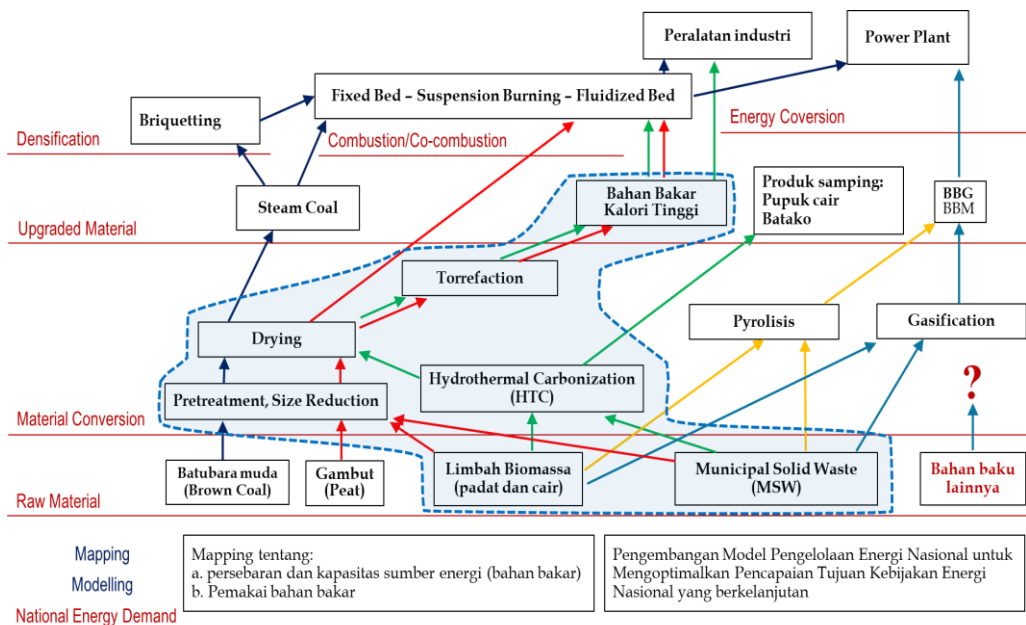
- Pemahaman parameter penting proses torefaksi gambut: Penentuan suhu optimum, waktu tinggal, serta analisis perubahan karakteristik kimia dan termal bahan.
- Desain dasar sistem reaktor kontinu: Inisiasi konsep sistem unggun terfluidisasi ganda (pengering dan torefaksi) untuk operasi kontinu, membuka jalan bagi pengembangan unit skala industri kecil-menengah.

Sementara itu, dari sudut pandang kebijakan dan strategi energi nasional, temuan dari penelitian ini memiliki dampak jangka panjang karena dapat menjadi dasar bagi penyusunan regulasi energi biomassa lokal yang mendorong pemerintah untuk mengeluarkan kebijakan pendukung pemanfaatan gambut secara berkelanjutan. Selain itu, teknologi torefaksi dapat dioperasikan dalam skala kecil dan bersifat desentralisasi sangat sesuai

untuk diterapkan di wilayah penghasil gambut seperti Sumatera, Kalimantan, dan Papua, sehingga turut memperkuat kemandirian energi daerah.

6 PENGEMBANGAN TEKNOLOGI KONVERSI BIOMASSA MENJADI BAHAN BAKAR PADAT SETARA BATUBARA MELALUI PROSES HIDROTERMAL DAN TOREFAKSI

Pengembangan teknologi konversi biomassa menjadi bahan bakar padat dalam hal ini merupakan bagian dari peta jalan umum Gambar 2.1 yaitu bagian pemrosesan biomassa limbah dan sampah kota (*Municipal Solid Waste, MSW*) yang ditunjukkan melalui Gambar 6.1 pada bagian yang diarsir biru. Penelitian dan pengembangan teknologi konversi biomassa sebagai bahan bakar ini dimulai pada tahun 2008 dengan metode pengeringan, torefaksi, dan hidrotermal.



Gambar 6.1 Peta jalan pengembangan bahan bakar alternatif bagian **biomassa**

6.1 Sumberdaya Biomassa Indonesia

Indonesia memiliki potensi energi baru-terbarukan yang besar, yaitu mencapai 3.687 GW, namun hanya dimanfaatkan sebesar 12,6 GW atau 0,30%. Dari beberapa jenis energi terbarukan, bioenergi memiliki potensi sebesar 57 GW, dengan nilai pemanfaatan sebesar 3,1 GW atau sekitar 5,40%. Angka ini

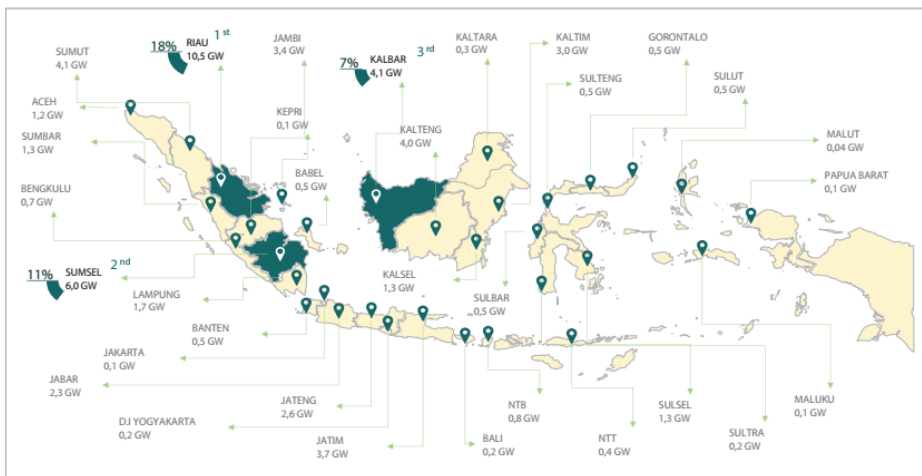
menempatkan bioenergi sebagai salah satu jenis energi yang sudah mulai dikembangkan, namun masih sangat terbuka untuk ditingkatkan.

Tabel 6.1 Potensi Energi Baru-Terbarukan Indonesia (Suharyati dkk, 2023)

Jenis	Total Potensi (GW)	Pemanfaatan (GW)	% Pemanfaatan
Laut	63	-	-
Panas Bumi	23	2,4	10,30%
Bioenergi	57	3,1	5,40%
Bayu	155	0,2	0,10%
Hidro	95	6,7	7,00%
Surya	3.294	0,3	0,01%
Total	3.587	12,6	0,30%

Bioenergi merupakan energi yang diperoleh dari bahan organik yang dapat diperbaharui, seperti limbah pertanian, limbah hewan, kayu, dan biomassa lainnya. Jenis-jenis utama bioenergi meliputi biomassa padat (seperti kayu dan limbah tanaman), biogas (dari fermentasi limbah organik), dan biofuel (bahan bakar cair, seperti biodiesel dan bioetanol). Bioenergi menawarkan keunggulan karena berasal dari sumber yang dapat diperbaharui dan dapat dikembangkan secara lokal, sehingga mendukung ketahanan energi nasional.

Peta sebaran potensi bioenergi di Indonesia menunjukkan bahwa Jawa Barat memiliki peran signifikan dalam kontribusi energi terbarukan nasional. Menurut peta *Outlook Energi Indonesia 2023* Ditjen DEN Gambar 6.2, provinsi ini memiliki potensi hingga 2,3 GW dari sumber bioenergi, menjadikannya salah satu wilayah dengan cadangan bioenergi terbesar di pulau. Data ini merefleksikan kayanya sumber biomassa berupa limbah pertanian dan kehutanan di Jawa Barat, sejalan dengan kondisi topografi dan agrikultur provinsi yang subur.

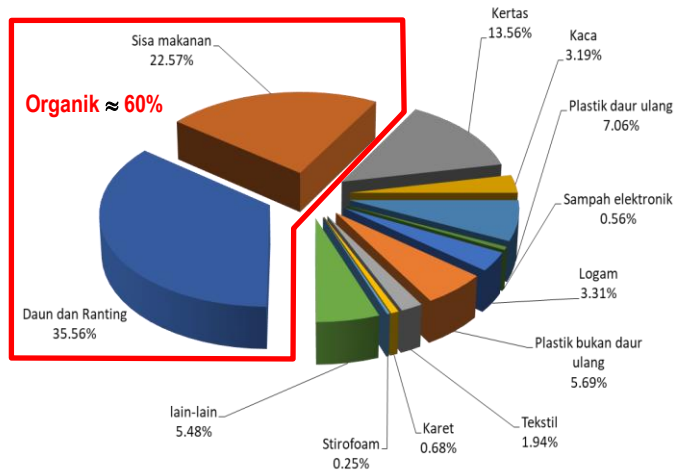


Sumber: Ditjen EBTKE, 2022 diolah kembali oleh SJ DEN

Gambar 6.2 Sebaran Potensi Bioenergi di Indonesia (Suharyati dkk, 2023)

Biomassa merupakan bahan organik yang dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk menghasilkan energi (Basu, 2018). Indonesia memiliki potensi biomassa yang sangat besar berkat kekayaan alamnya dan sektor pertanian yang dominan. Dengan luas lahan pertanian, perkebunan, dan kehutanan yang sangat luas, Indonesia menghasilkan limbah biomassa dalam jumlah besar setiap tahunnya. Biomassa banyak ditemukan dalam bentuk limbah pertanian seperti sekam padi, jerami, dan tandan kosong kelapa sawit. Biomassa juga meliputi limbah hutan, limbah industri makanan, dan bahkan sampah organik rumah tangga.

Limah pertanian dan sampah kota menyumbang fraksi terbesar dari biomassa yang belum dimanfaatkan. Penelitian menunjukkan bahwa Indonesia menghasilkan lebih dari 55 juta ton limbah pertanian per tahun (Syaichurrozi et al., 2025), sementara sampah kota terdiri atas 60–70% bahan organik (Amrul, 2014). Gambar 6.3 menunjukkan komposisi sampah Kota Bandung, di mana sampah organik mencapai $\pm 60\%$ dari keseluruhan sampah. Ini berarti lebih dari separuh sampah kota yang dihasilkan merupakan sampah organik.



Gambar 6.3 Komposisi Sampah Kota Bandung (Amrul, 2014)

Biomassa limbah dari sektor pertanian dan kehutanan di Indonesia menunjukkan potensi energi yang sangat besar dan beragam. Limbah hasil pertanian seperti jerami dan sekam padi menyumbang sekitar $1,2 \times 10^9$ GJ per tahun, menjadikannya sumber biomassa terbesar. Di sektor perkebunan, kelapa sawit menghasilkan limbah dalam bentuk tandan kosong, serabut, dan cangkang dengan total potensi energi mencapai 408×10^6 GJ per tahun. Sumber ini sangat melimpah mengingat luasnya lahan sawit di Indonesia. Sementara itu, industri karet juga berkontribusi signifikan dengan 350×10^6 GJ per tahun, meskipun limbahnya lebih tersebar dan memerlukan pengumpulan yang efisien. Komoditas jagung, melalui limbah bonggol dan pelepahnya, menghasilkan 218×10^6 GJ per tahun, sedangkan sektor kehutanan menyediakan limbah kayu berupa serbuk dengan potensi sebesar $48,8 \times 10^6$ GJ per tahun (Mulyana, 2016).

Biomassa terdiri atas senyawa kompleks seperti selulosa, hemiselulosa, lignin, serta protein dan lipid dalam proporsi tertentu. Karakteristiknya yang heterogen membuat proses konversi menjadi energi menjadi tantangan tersendiri. Selain itu, pemakaian biomassa limbah harus dilakukan secara berimbang, artinya tidak hanya mempertimbangkan ketersediaan dan efisiensi energi yang dihasilkan, tetapi juga memperhatikan aspek lingkungan dan sosial. Pengambilan biomassa secara berlebihan tanpa memperhatikan

siklus alami dapat merusak ekosistem, mengurangi bahan organik tanah, dan berdampak negatif terhadap produktivitas lahan dalam jangka panjang.

Basu (2018) menekankan bahwa pemanfaatan biomassa membutuhkan perlakuan awal (*pretreatment*) untuk mengatasi tantangan seperti kadar air yang tinggi, kandungan senyawa berbahaya, heterogenitas komposisi, dan potensi emisi polutan saat proses konversi. Proses awal ini bisa berupa pengeringan, densifikasi, atau konversi menjadi bahan bakar kualitas tinggi. Tanpa adanya tahap ini, pemanfaatan biomassa dapat menyebabkan efek samping negatif pada tungku pengguna bahan bakar padat. Oleh karena itu, pendekatan teknologi yang tepat dan kebijakan pengelolaan yang hati-hati menjadi prasyarat untuk memastikan bahwa pemanfaatan biomassa limbah benar-benar berkontribusi positif terhadap transisi energi dan keberlanjutan lingkungan.

Riset yang difokuskan pada komponen organik, khususnya dari biomassa limbah dan sampah kota, menjadi sangat penting dalam konteks pengembangan energi terbarukan dan pengelolaan lingkungan berkelanjutan. Komponen organik merupakan bagian terbesar dari total volume sampah di Indonesia, dengan dominasi berasal dari sisa makanan, limbah pertanian, serta limbah kebun dan pasar. Potensi energi yang terkandung dalam komponen ini sangat tinggi, namun sering kali belum dimanfaatkan secara optimal akibat keterbatasan teknologi, infrastruktur, dan informasi ilmiah yang memadai. Oleh karena itu, fokus penelitian perlu diarahkan pada karakterisasi komposisi komponen organik, studi potensi kalor, serta pengembangan teknologi konversi termal antara lain dengan torefaksi. Selain menghasilkan energi, pemanfaatan komponen organik juga dapat mereduksi volume sampah kota secara signifikan, mengurangi beban TPA. Riset berbasis data lokal akan menjadi fondasi penting bagi pengambilan kebijakan strategis, sekaligus mendorong implementasi ekonomi sirkular di sektor energi dan pengelolaan sampah.

6.2 Biomassa Sebagai Bahan Bakar

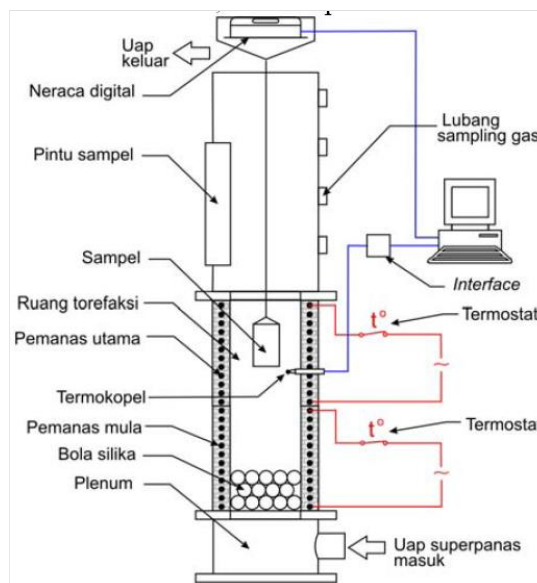
Sebagai bahan bakar, biomassa memiliki potensi besar untuk menggantikan bahan bakar fosil dalam menghasilkan energi. Untuk meningkatkan kualitas biomassa sebagai bahan bakar padat, maka diperlukan proses konversi. Proses ini memungkinkan biomassa diubah menjadi bahan bakar dengan nilai kalor

tinggi dan dapat digunakan untuk keperluan domestik, industri, maupun pembangkit listrik.

6.2.1 Torefaksi multikomponen sampah kota

Sampah kota (*municipal solid waste*, MSW) mengandung bahan organik yang mempunyai nilai kalor cukup tinggi sehingga berpotensi digunakan sebagai bahan bakar. Teknologi pengolahan multi-komponen sampah ini dilakukan melalui proses torefaksi, yaitu pirolisis pada temperatur rendah. Proses torefaksi menghasilkan produk utama berupa material padat. Proses ini terbilang relatif sederhana, karena berlangsung pada temperatur yang relatif rendah dan tekanan atmosfer.

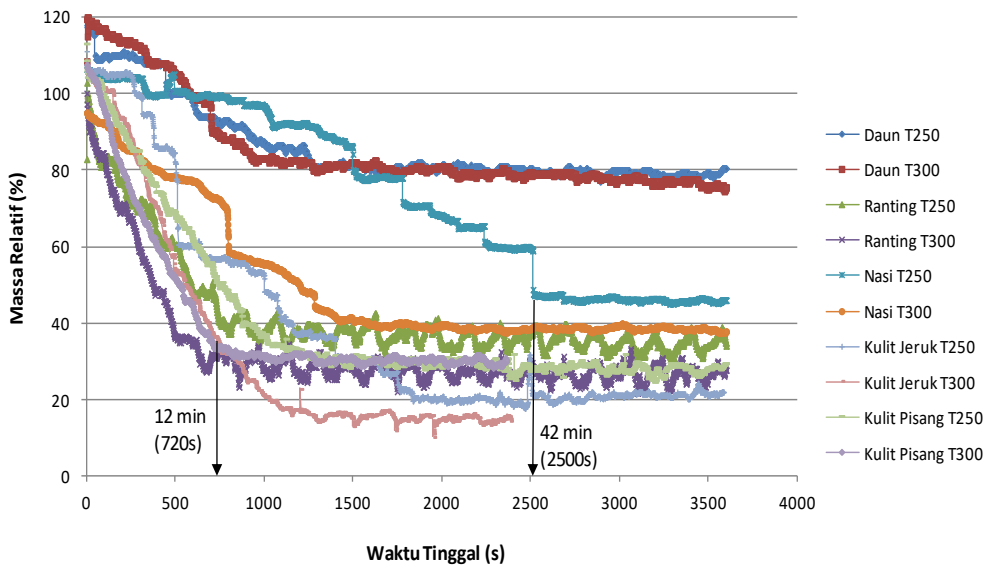
Peralatan yang digunakan pada riset ini adalah reaktor torefaksi skala lab jenis *batch* dengan bantuan seperangkat sistem akusisi data (Gambar 6.4). Eksperimen torefaksi dilakukan terhadap masing-masing komponen sampah dilanjutkan dengan sampah campuran.



Gambar 6.4 Reaktor torefaksi skala lab jenis *batch*

Karakteristik penurunan massa pada proses torefaksi sampah menunjukkan profil yang sama untuk semua sampel. Profil kurva penurunan massa memperlihatkan laju penurunan yang cepat di awal proses dan setelah itu melambat menuju asimtot. Massa padatan (arang) yang diperoleh diakhir

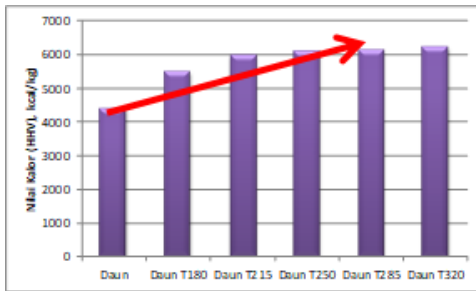
proses dipengaruhi oleh temperatur torefaksi, kandungan air, dan kandungan lignoselulosa sampel. Massa padatan yang diperoleh di akhir proses bervariasi antara 20-80% (Gambar 6.5).



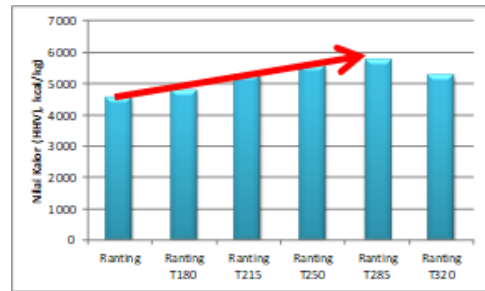
Gambar 6.5 Kurva mass yield selama proses torefaksi (Amrul, 2014)

Nilai kalor produk tertinggi yang diperoleh pada masing-masing komponen sampah dihasilkan dari temperatur yang bervariasi. Nilai kalor tertinggi untuk torefaksi daun, ranting, nasi, kulit jeruk, dan kulit pisang secara berurutan diperoleh pada temperatur 320 °C, 285 °C, 250 °C, 320 °C, dan 215 °C dengan nilai antara 5.100-6.800 kcal/kg (Gambar 6.6).

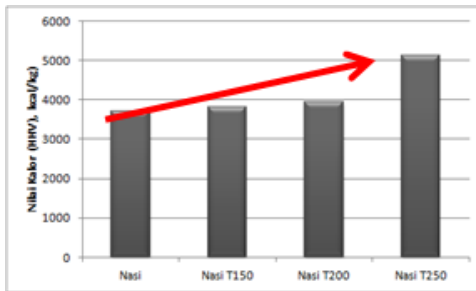
Perumusan temperatur optimal (Persamaan 6.1) dan prediksi nilai kalor (Persamaan 6.2) untuk proses torefaksi sampah campuran dilakukan terhadap tiga model komposisi komponen sampah kota. Dari hasil perumusan ini, temperatur optimal untuk torefaksi sampah campuran adalah 285 °C dengan prediksi nilai kalor sebesar 5.724 kcal/kg, yakni nilai kalor tertinggi dari ketiga model tersebut. Validasi hasil perumusan melalui eksperimen memberikan nilai kalor tertinggi sebesar 5.465 kcal/kg. Nilai kalor produk torefaksi yang diperoleh melalui perumusan dan eksperimen tidak berbeda signifikan, yakni setara dengan nilai kalor batubara subbituminus B (5.300-5.800 kcal/kg).



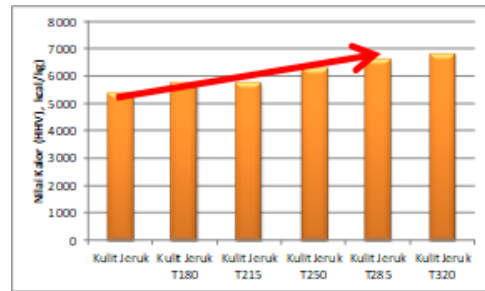
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 6.6 Nilai kalor hasil torefaksi daun (a), torefaksi ranting (b), torefaksi nasi (c), torefaksi kulit jeruk (d) (Amrul, 2014)

Model parametrik nilai kalor hasil torefaksi (Amrul, 2014):

Temperatur torefaksi

$$T_{sc} = \sum_{i=1}^n T_i x_i \quad (6.1)$$

Nilai kalor torefaksi

$$HHV_{sc} = \sum_{i=1}^n HHV_i x_i \quad (6.2)$$

Hasil-hasil yang diperoleh dari eksperimen torefaksi sampah reaktor *batch* ini dijadikan dasar untuk perancangan sistem torefaksi sampah kontinu dalam bentuk pemodelan pabrik torefaksi sampah skala industri kecil. Dari model yang dikembangkan ini dilakukan analisis dasar kelayakan energi dan simulasi finansial kelayakan ekonomi. Hasil simulasi analisis energi menunjukkan

bahwa keseimbangan antara kebutuhan energi (panas) sistem dengan energi (panas) yang diproduksi diperoleh pada kondisi kandungan air sampah umpan sekitar 75%. Hasil simulasi finansial kelayakan ekonomi menunjukkan bahwa pembangunan pabrik torefaksi sampah skala industri kecil dapat memberikan keuntungan ekonomi dengan syarat-syarat tertentu.

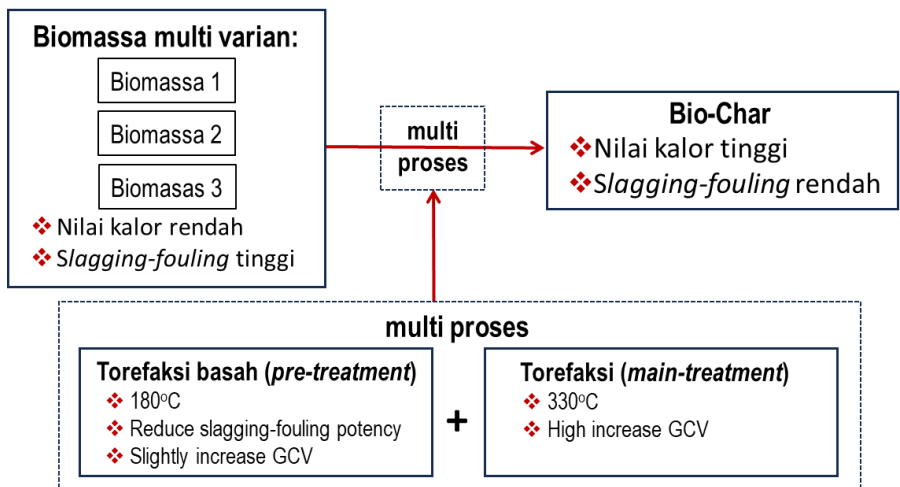
6.2.2 Konversi simultan biomassa limbah multivarian menjadi bahan bakar padat berkualitas tinggi melalui metode torefaksi multiproses

Penggunaan biomassa sebagai bahan bakar langsung menghadapi sejumlah kendala teknis yang signifikan, yang perlu diperhatikan dalam pengembangannya sebagai sumber energi alternatif. Salah satu tantangan utama adalah sifat biomassa yang heterogen, baik dari segi ukuran partikel, kadar air, maupun komposisi kimianya. Heterogenitas ini menyulitkan proses pembakaran yang stabil dan efisien, serta memerlukan sistem pengolahan awal yang kompleks. Selain itu, biomassa umumnya memiliki nilai kalor yang rendah dibandingkan bahan bakar fosil, sehingga menghasilkan energi yang lebih sedikit per satuan massa dan membutuhkan volume bahan bakar yang lebih besar untuk menghasilkan energi dalam jumlah yang sama.

Kendala lain yang tidak kalah penting adalah tingginya potensi *slagging* dan *fouling*, yaitu terbentuknya kerak dan endapan pada permukaan alat pembakaran akibat kandungan abu dan alkali yang tinggi dalam biomassa. Fenomena ini dapat menurunkan efisiensi termal, mempercepat kerusakan peralatan, serta meningkatkan biaya pemeliharaan dan operasi. Oleh karena itu, untuk meningkatkan efektivitas biomassa sebagai bahan bakar langsung, diperlukan upaya rekayasa teknologi dan pemrosesan awal seperti pengeringan, peletisasi, atau pencampuran dengan bahan bakar lain guna meningkatkan homogenitas dan kualitas energi yang dihasilkan.

Penggunaan torefaksi multiproses, yang mengombinasikan torefaksi basah (*hydrothermal*) sebagai *pre-treatment* dan torefaksi kering sebagai *main-treatment*, merupakan pendekatan teknologi yang efektif dalam meningkatkan kualitas biomassa sebagai bahan bakar padat. Torefaksi basah dilakukan pada temperatur 180 °C dan berfungsi sebagai tahap awal untuk memperbaiki sifat fisik dan kimia biomassa, seperti mengurangi kadar air, dan memecah struktur lignoselulosa yang kompleks agar lebih homogen. Tahap ini juga membantu

menghilangkan sebagian kandungan alkali pada abu yang menjadi penyebab utama *slagging* dan *fouling* dalam proses pembakaran. Selanjutnya, proses torefaksi kering pada temperatur 330 °C memperkuat efek peningkatan nilai kalor dengan menurunkan kadar volatil dan meningkatkan stabilitas termal biomassa. Kombinasi kedua proses ini memberikan sinergi yang unggul, dengan menggunakan kelebihan dua metode torefaksi (Gambar 6.7).



Gambar 6.7 Bagan konsep konversi simultan tiga jenis biomassa menggunakan torefaksi multiproses (Efendi, 2025)

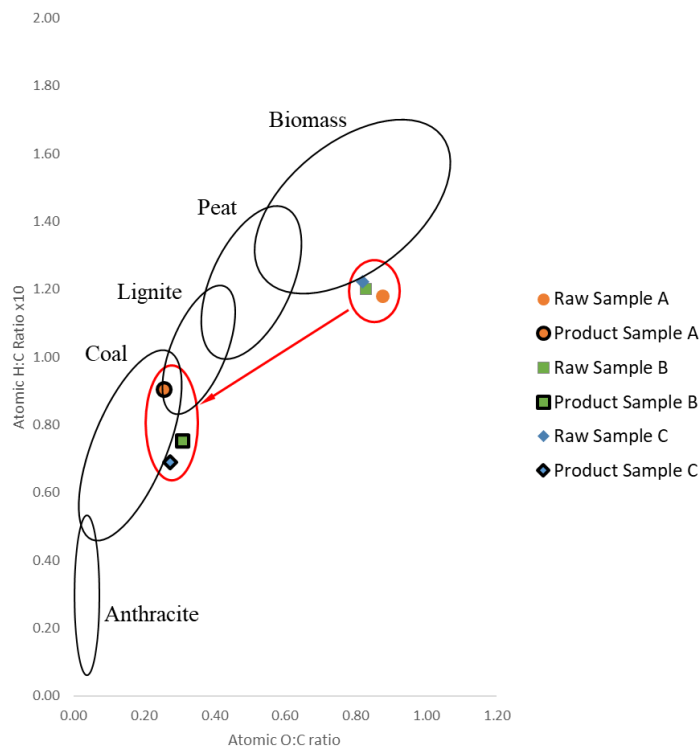
Pada konversi simultan dengan metode torefaksi multiproses ini, tiga jenis biomassa limbah diproses secara bersamaan agar proses dapat lebih efektif dari pada permrosesan masing-masing varian biomassa. Komponen biomassa dibuat bervariasi sesuai Tabel 6.2 agar dapat diketahui karakteristik produk yang didapat jika satu jenis biomassa lebih tinggi persentasenya dari pada yang lain.

Tabel 6.2 Variasi komponen biomassa pada konversi simultan biomassa limbah melalui torefaksi multiproses (Efendi, 2025)

Komponen	Sampel A	Sampel B	Sampek C
Biomassa 1: jerami	50%	25%	25%
Biomassa 2: tandan kosong sawit	25%	50%	25%
Biomassav3: serbuk kayu	25%	25%	50%

Diagram Van Krevelen yang ditampilkan pada Gambar 6.8 menunjukkan perubahan rasio atomik hidrogen terhadap karbon (H/C) dan oksigen terhadap karbon (O/C) dari biomassa mentah dan hasil produk setelah perlakuan termal.

Titik-titik pada grafik ini menunjukkan tiga jenis sampel biomassa (*Raw Sample A, B, dan C*), masing-masing dibandingkan dengan hasil perlakuannya (*Product Sample A, B, dan C*). Secara umum, biomassa mentah memiliki rasio O/C dan H/C yang tinggi, yang menandakan kandungan oksigen dan hidrogen yang masih besar dalam struktur molekulnya, karakteristik yang umum pada bahan organik yang belum mengalami dekomposisi termal.



Gambar 6.8 Diagram van krevelen konversi simultan tiga jenis biomassa menggunakan torefaksi multi-proses (Efendi, 2025)

Setelah proses torefaksi atau perlakuan serupa, posisi sampel berpindah ke arah kiri bawah pada grafik—menuju daerah yang dihuni oleh lignit dan batubara (*coal*). Pergeseran ini menunjukkan penurunan rasio O/C dan H/C, yang mengindikasikan proses dehidrasi (penghilangan air), dekarboksilasi (penghilangan gugus karboksil), dan deoksigenasi (pengurangan kandungan oksigen). Dampaknya adalah peningkatan nilai kalor biomassa dan sifat pembakarannya yang lebih menyerupai batubara—dengan kandungan karbon yang lebih tinggi dan emisi gas buang yang lebih terkendali.

Data pada Tabel 6.3 menunjukkan peningkatan signifikan nilai kalor (dalam MJ/kg) dari tiga sampel biomassa (Sampel A, B, dan C) setelah proses konversi. Nilai kalor biomassa mentah berkisar antara 15,66–16,61 MJ/kg, yang secara umum dikategorikan dalam klasifikasi biomassa alami dengan kandungan air dan senyawa volatil yang masih tinggi. Setelah perlakuan termal, nilai kalor meningkat menjadi 19,08 MJ/kg untuk Sampel A; 21,85 MJ/kg untuk Sampel B; dan 22,40 MJ/kg untuk Sampel C. Peningkatan ini mencerminkan pengurangan kadar oksigen dan kadar air dalam struktur biomassa, serta peningkatan konsentrasi karbon, yang selaras dengan tren pada diagram Van Krevelen.

Tabel 6.3 Peningkatan nilai kalor pada konversi simultan biomassa limbah melalui torefaksi multiproses (Efendi, 2025)

	Nilai kalor (MJ/kg)		Klasifikasi	
	Mentah	Produk	Mentah	Produk
Sampel A	15,66	19,08	Biomassa	Lignite B
Sampel B	16,47	21,85	Biomassa	Sub-bitum B
Sampel C	16,61	22,40	Biomassa	Sub-bitum B

Secara klasifikasi, perubahan nilai kalor menyebabkan pergeseran karakteristik bahan dari kategori biomassa mentah ke dalam kelas Lignite B (untuk Sampel A) dan Subbituminous B (untuk Sampel B dan C). Klasifikasi ini mencerminkan kemiripan sifat termal dan pembakaran produk hasil perlakuan dengan batubara kelas menengah.

Data potensi *slagging* dan *fouling* dari tiga sampel biomassa, baik dalam kondisi mentah maupun setelah proses peningkatan kualitas (produk) ditunjukkan melalui Tabel 6.4. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai indeks *slagging* menurun setelah perlakuan pada semua sampel: Sampel A dari 0,036 menjadi 0,028; Sampel B dari 0,059 menjadi 0,037; dan Sampel C dari 0,052 menjadi 0,043. Secara klasifikasi, seluruh sampel tetap berada pada kategori potensi *slagging* rendah ("Low"), baik sebelum maupun sesudah perlakuan.

Dalam hal potensi *fouling*, terjadi penurunan signifikan dalam indeks *fouling* setelah perlakuan termal ditunjukkan juga pada Tabel 6.4. Sampel A turun dari 6,14 menjadi 3,27; Sampel B dari 11,87 menjadi 4,43; dan Sampel C dari 8,92 menjadi 6,76. Penurunan indeks ini mengindikasikan bahwa produk

hasil perlakuan memiliki kandungan alkali pada abu yang lebih rendah dibandingkan biomassa belum terproses.

Tabel 1.4 Penurunan potensi slagging foiling pada konversi simultan biomassa limbah melalui torefaksi multi-proses (Efendi, 2025)

	Potensi slagging			Potensi fouling		
	Mentah	Produk	Potensi	Mentah	Produk	Potensi
	Indeks	Indeks		Indeks	Indeks	
Sampel A	0.036	0.028	Low	6.14	3.27	Medium
Sampel B	0.059	0.037	Low	11.87	4.43	Medium
Sampel C	0.052	0.043	Low	8.92	6.76	Medium

6.3 Catatan Penutup dari Pengembangan Biomassa

Penelitian dan pengembangan ini secara komprehensif menunjukkan bahwa proses-proses termal, khususnya hidrotermal dan torefaksi, dapat menjadi teknologi kunci dalam konversi biomassa menjadi bahan bakar padat berkualitas tinggi. Selain peningkatan nilai kalor, kombinasi proses hidrotermal dan torefaksi juga menghasilkan bahan bakar dari biomassa dengan indeks *slagging* dan *fouling* yang lebih rendah dari asalnya, sehingga bisa menekan efek negatif yang timbul terhadap peralatan pembakaran. Hal ini membuktikan bahwa biomassa, termasuk sampah kota, sesungguhnya memiliki potensi energi berkesinambungan yang bisa memenuhi kebutuhan pengganti batubara jika dikelola dengan pendekatan teknologi yang tepat.

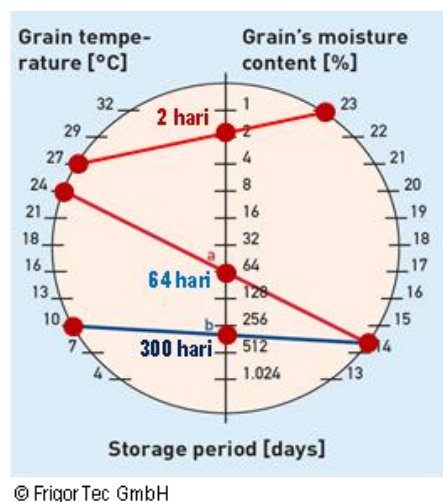
Sebagai pengakuan atas nilai kebaruan dan aplikasinya, inovasi proses konversi fraksi organik sampah kota menjadi bahan bakar padat ini telah memperoleh paten nasional dengan nomor IDP000067182. Paten ini diberikan atas nama Dr. Ir. Toto Hardianto, Prof. Dr. Ir. Aryadi Suwono, Prof. Dr. Ir. Ari Darmawan Pasek, dan Dr. Amrul, S.T., M.T. berlaku sejak 1 Desember 2015 hingga 1 Desember 2035. Perlindungan paten tersebut menegaskan bahwa hasil penelitian ini tidak hanya memiliki kontribusi akademik, tetapi juga relevansi komersial dan potensi implementasi dalam skala luas di industri energi alternatif Indonesia.

7 PENGEMBANGAN PENGERING JAGUNG BERGERAK (MOBILE CORN DRYER, MCD)

Ada satu kegiatan pengembangan yang dilakukan oleh penulis dan tim yang agak lebih ke hilir dan lebih langsung terpakai di masyarakat, yaitu pengembangan pengering jagung bergerak (*mobile corn dryer*, MCD). Kegiatan ini agak keluar dari peta jalan utama penelitian dan pengembangan (yang berfokus pada pengembangan bahan bakar) yang dilakukan sebagai bentuk kepedulian terhadap kebutuhan masyarakat petani jagung di *remote area* untuk mempertahankan kualitas jagung pascapanen. Kegiatan ini terrealisasi berkat kerjasama antara penulis dan tim ITB dengan mitra industri berbasis pakan ternak Charoen Pokphand Indonesia (CPI), atas prakarsa mitra industri.

7.1 Permasalahan Jagung pada Masa Pascapanen

Tanaman jagung dapat dipanen sampai tiga kali dalam setahun, maka saat panen kadang-kadang jatuh pada musim panas (jagung kering) atau musim hujan (jagung basah). Komponen utama butir jagung adalah tepung (*starch*) dengan karakteristik ketahanan kualitas butir jagung pascapanen bila disimpan sebelum diproses lebih lanjut tergantung pada dua hal, yaitu kandungan air (*moisture content*, MC) dan temperatur penyimpanan (T), yang ditunjukkan melalui Gambar 7.1.

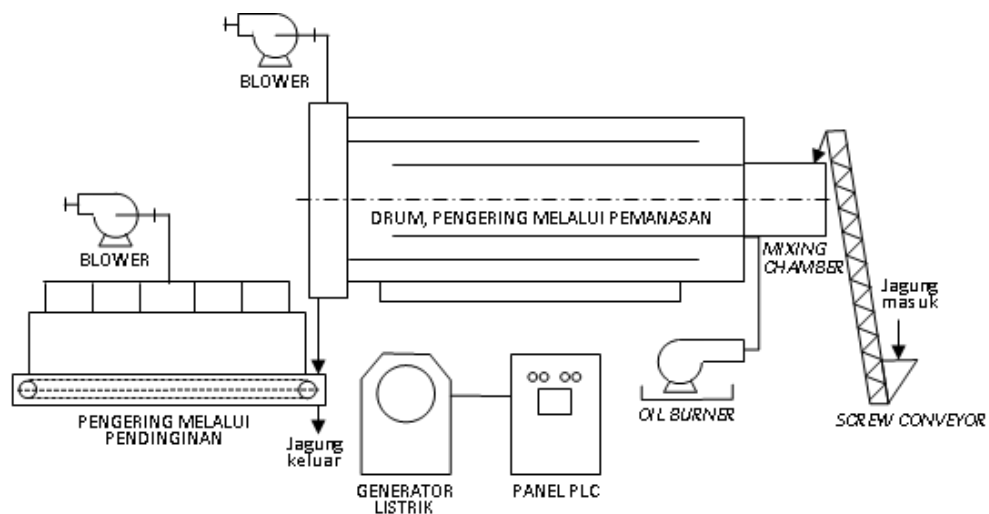


Gambar 7.1 Diagram rumus durasi penyimpanan fungsi T dan MC

Jagung dengan MC = 14% disimpan pada $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, tahan disimpan selama 300 hari, sedangkan pada MC yang sama bila disimpan pada $T = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ hanya bertahan selama 64 hari, bahkan bila penyimpanannya pada Tingkat keadaan lingkungan tropis saat musim hujan, yaitu misalnya dengan MS = 23% dan $T = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$, maka kualitas jagung hanya bertahan selama dua hari. Oleh karena itu, sangat diperlukan alat pengering jagung untuk menurunkan kadar MC di sekitar 14% agar kualitas jagung bisa bertahan selama waktu disimpan, diangkut, dan diproses selanjutnya. Khusus untuk daerah *remote area* yang perlu waktu yang agak lama dalam proses penyimpanan dan pengangkutannya, diperlukan mesin pengering jagung yang bisa bergerak ke *remote area*. Maka dikembangkanlah pengering jagung bergerak (*mobile corn dryer*, MCD) untuk memenuhi kebutuhan tersebut.

7.2 Pengering Jagung Bergerak

Dikembangkan mesin pengering jagung yang bisa bergerak untuk mendekati sentra jagung yang terletak jauh dari daerah berfasilitas pengering besar. Secara skematik, system pengering jagung digambarkan dalam diagram alir proses (*process flow diagram*) Gambar 7.2, sedangkan gambar isometrinya ditunjukkan melalui Gambar 7.3.



Gambar 7.2 Diagram alir proses pengering jagung bergerak



Gambar 7.3 Gambar isometri pengering jagung bergerak

Kinerja Pengering Jagung Bergerak:

Kapasitas operasi : 1,0 – 1,5 ton/jam

Penurunan kandungan air : 6 – 10%

Konsumsi BBM : 1,5 – 2,0 liter solar/ ton/ % kandungan air

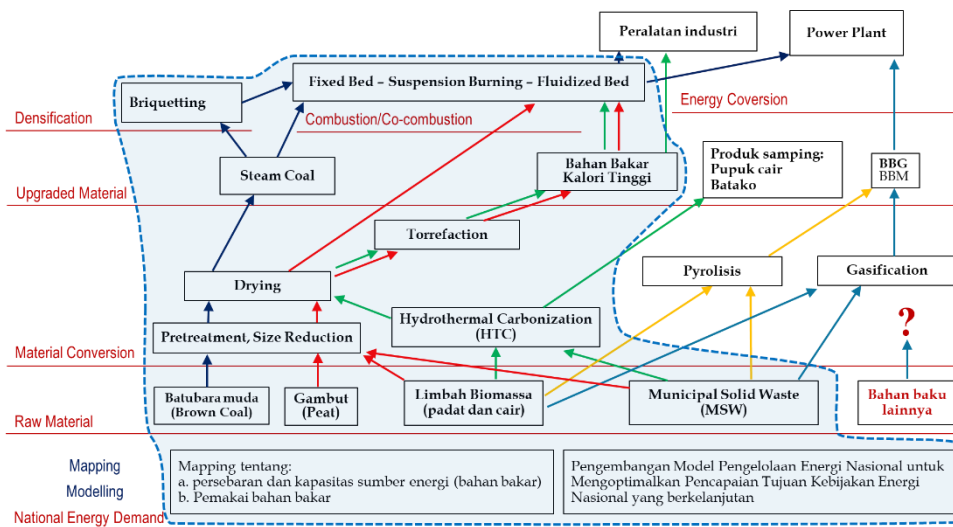
Prototipe Pengering Jagung Bergerak yang bisa dinaik-turunkan dari truk pengangkut ditunjukkan melalui Gambar 7.4.



Gambar 7.4 Gambar isometri pengering jagung bergerak

8 PENUTUP

Tulisan ini berisi rangkuman kegiatan penelitian dan pengembangan yang dilakukan penulis pada 30 tahun terakhir sebagai staf dosen ITB hingga saat ini. Secara keseluruhan, cakupan kegiatan penelitian dan pengembangan bahan bakar padat alternatif untuk mendukung pemenuhan energi berkelanjutan yang telah dilakukan penulis dan tim pada peta jalan ditunjukkan melalui Gambar 8.1 pada bagian yang diarsir biru.



Gambar 8.1 Bagian Peta Jalan Pengembangan Bahan Bakar Alternatif yang sudah terealisasi

Ke depan, penelitian dan pengembangan bahan bakar alternatif pada peta jalan di atas secara konsisten akan dilanjutkan dan mencakup topik-topik yang belum terrealisasi saat ini, sebagai pelengkap tujuan mendukung pemenuhan energi berkelanjutan di Indonesia.

Di samping kegiatan penelitian dan pengembangan dalam bidang bahan bakar alternatif, disajikan juga kegiatan pengembangan pengering jagung bergerak yang merupakan pengembangan sangat hilir dan langsung memberikan solusi permasalahan riil di masyarakat.

6 UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Swt. atas segala nikmat dan rahmat-Nya yang telah dikaruniakan kepada penulis hingga diberi amanah jabatan Guru Besar dalam bidang Teknik Mesin di Institut Teknologi Bandung.

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Pimpinan ITB, Senat Akademik ITB, Pimpinan dan segenap anggota Forum Guru Besar ITB, serta Civitas Akademika ITB atas dukungannya sehingga penulis mendapat amanah jabatan guru besar, melaksanakan orasi ilmiah, dan menerbitkan buku ini.

Terima kasih khususnya kepada Prof. Tatacipta Dirgantara, Prof. Hermawan Judawisastra, dan Prof. Lavi Rizki Zuhail yang menjadi pimpinan FTMD pada saat proses kenaikan jabatan penulis, atas dukungan yang luar biasa sehingga jabatan akademik guru besar penulis dapat dicapai. Terima kasih juga disampaikan kepada Senat FTMD, kolega Kelompok Keahlian Ilmu dan Rekayasa Termal, para kolega dosen dan tendik FTMD, atas dukungannya. Terima kasih juga kepada Dr. Firman Bagja Juangsa dan Azhyra untuk bantuannya selama proses kenaikan jabatan guru besar.

Terima kasih kepada para guru besar pemberi rekomendasi, Prof. Djoko Suharto, Prof. Ari Darmawan Pasek, Prof. Prihadi Setyo Darmanto, Prof. Herri Susanto, Prof. Suyitno (Universitas Sebelas Maret, Surakarta), dan Prof. Emeritus G. Ali. Mansoori (The University of Illinois at Chicago, USA). Terima kasih juga kepada Prof. Ari Darmawan Pasek atas bantuannya dalam menyunting buku ini.

Terima kasih kepada mentor penulis, Prof. Aryadi Suwono (Alm.), rekan-rekan yang telah banyak berinteraksi dan berkolaborasi dalam berbagai kegiatan penelitian, pendidikan dan pembimbingan mahasiswa: Prof. Tubagus Ahmad Fauzi Soelaiman, Dr. Pandji Prawisudha, Adrian Rizky Irhamna S.T., M.T., Dr. Yuli Setyo Indartono, Ir. Hendi Riyanto MSME, Dr. Willy Adriansyah, Dr. Tamura (IHI, Japan). Terima kasih juga penulis sampaikan kepada seluruh alumni mahasiswa bimbingan yang telah menjadi mitra dalam berkarya selama ini.

Terima kasih juga kepada seluruh staf FTMD yang tidak dapat disebutkan satu per satu untuk kerja sama dan interaksi yang baik dalam berbagai kegiatan

Tri Dharma. Juga kepada tenaga kependidikan FTMD yang mendukung proses administrasi dalam berbagai kegiatan.

Secara khusus penulis sampaikan ucapan terima kasih kepada kedua orang tua tercinta: Bapak Munadi Syarif (Alm.) dan ibu Mardiningsih (Alm.) yang telah membesarkan, mendidik, memberikan inspirasi, dan selalu mendoakan penulis. Terima kasih juga kepada kakak-kakak, adik-adik, keponakan yang telah memberikan dukungan, perhatian, serta doa.

Terima kasih kepada bapak-ibu mertua: Bapak Marsono (Alm.) dan ibu Roemi (Alm.), Bapak Mualimin (Alm.) dan Ibu Suwarsi (Alm.) serta adik-adik ipar dan keponakan atas kepercayaan, perhatian, dan doa yang telah diberikan.

Ucapan terima kasih yang tak terhingga saya sampaikan kepada istri tercinta, Dyah Kuswandari S.H., serta anak-anak terkasih, Rhonita Dea Andarini S.T., M.T., dan Ardian Yudo Dewanto S.T., MBA, yang selalu setia menemani dan memberikan dukungan penuh selama ini, sehingga menjadi sumber kekuatan dan inspirasi bagi penulis.

Ucapan terima kasih dan penghargaan disampaikan kepada semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, namun telah memberikan kontribusi berarti dalam perjalanan ini. Semoga Allah Swt. memberikan balasan yang berlipat ganda atas berbagai kebaikan yang telah diberikan. Aamin ya robbal'alamiin.

DAFTAR PUSTAKA

- Suharyati dkk (2023): Outlook Energi Indonesia, *Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional* Indonesia.
- Hutrindo, E. (2022): Pengembangan Model Sistem Pengelolaan Energi Nasional Untuk Mencapai Ketahanan Energi, Kemandirian Energi, Berkelanjutan dan Kesepakatan Paris Secara simultan dan Seimbang Berbasis Dinamika Sistem, *Program Studi Doktor Teknik Mesin*, FTMD ITB.
- Bergman, P.C.A., Boersma, A.R., dan Jacob, H.A. (2004): Torrefaction For Entrained-Flow Gasification of Biomass, Energy Research Center of Netherlands (ECN), Unit ECN Biomass, Eindhoven.
- Haryadi (2006): Pengembangan Sistem Torefaksi Untuk Meningkatkan Nilai Kalor Gambut Sebagai Bahan Bakar Padat Setara Batubara, *Program Studi Doktor Teknik Mesin*, FTMD ITB.
- Amrul (2008): Pemanfaatan sampah Menjadi Bahan Bakar Padat Melalui Proses Torefaksi, *Program Studi Doktor Teknik Mesin*, FTMD ITB.
- Basu, P. (2018): Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. *Academic Press*.
- Mulyana, R. (2016): Pedoman investasi bioenergi di Indonesia. *Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Indonesia*.
- Efendi M.A.A. (2025): Konversi simultan biomassa limbah multivarian menjadi bahan bakar padat kualitas tinggi melalui metode torefaksi multiproses. *Program Studi Doktor Teknik Dirgantara*, FTMD ITB.
- Syaichurrozi, I. et al. (2025): Biogas generation from anaerobic co-digestion of tofu liquid waste and tapioca flour liquid waste at various initial pHs. *Journal of Ecological Engineering* 26(7), 11-23.
- Amrul, T. Hardianto, A. Suwono, and A.D. Pasek (2009): A Study on Indonesian Municipal Solid Waste Potential for High Calorific Solid Fuel by Torrefaction Process, *Preprints of International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion 2009*, Tongyeong, Korea.

- Toto Hardianto, Amrul, Aryadi Suwono, and Ari Darmawan Pasek (2010): Upgrading of Municipal Solid Waste as Solid Fuel to Subbituminous Coal Grade by Torrefaction Process, *Proceedings of Regional Conference on Mechanical and Aerospace Technology 2010*, Bali, Indonesia.
- Aryadi Suwono, Amrul, T. Hardianto, dan A.D. Pasek (2010): Solid Fuel from Torrefied Municipal Solid Waste, *Proceedings of Renewable energy 2010 Conference, joint with 4th International Solar Energy Society Conference, Asia Pacific Region*, Yokohama, Japan.
- Toto Hardianto, Aryadi Suwono, Ari Darmawan Pasek, dan Amrul (2010): Karakterisasi Sifat-Sifat Pembakaran Bahan Bakar Padat Ramah Lingkungan yang Berasal dari Sampah Kota, *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) ke 9*, Palembang.
- Amrul, A. Suwono, A.D. Pasek, T. Hardianto (2010): The Influence of Municipal Solid Waste Components Composition on Main Parameters of Torrefaction to Produce High-Calorie Solid Fuel, *Proceedings of the 5th International Conference on Cooling and Heating Technologies*, Bandung, Indonesia.
- Toto Hardianto, Aryadi Suwono, Ari Darmawan Pasek, dan Amrul (2011): Balance Energi pada Proses Torefaksi Sampah Kota Menjadi Bahan Bakar Padat Ramah Lingkungan Setara Batubara untuk Memperhitungkan Kelayakannya, *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) X*, UB Malang-Jatim.
- Toto Hardianto, Aryadi Suwono, Ari Darmawan Pasek, Nathanael P. Tandian, Willy Adriansyah, Haryadi, Amrul Hamzah, dan Willem Lawrence (2011): Pengembangan Beberapa Jenis Bahan Bakar Padat dari Kelompok Energi Baru dan Terbarukan, Keynote Paper pada *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi dalam Penanganan Energi 2011*, Jurusan Teknik Mesin Universitas Achmad Yani, Cimahi.
- Amrul, Aryadi Suwono, Toto Hardianto, dan Ari Darmawan Pasek (2012): Studi Awal Kelayakan Ekonomi Pabrik Torefaksi Sampah Perkotaan Menjadi Bahan Bakar Padat Setara Batubara Skala Pilot Berkapasitas 25 Ton per Jam, *Prosiding Seminar Nasional Energi Terbarukan dan Produksi Bersih 2012*, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.

- Toto Hardianto, Aryadi Suwono, Ari Darmawan Pasek, dan Amrul (2013): Konversi Sampah Kota Menjadi Bahan Bakar Padat: Modifikasi Sistem Torefaksi Kontinu Unggun Terfluidisasi untuk Mengakomodasi Karakteristik Sampah, *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) XII*, Unila Bandar Lampung.
- Amrul, Toto Hardianto, Aryadi Suwono, Ari Darmawan Pasek, dan Adrian Rizki Irhamna (2013): Konversi Bahan Bakar Padat dari Sampah Kota melalui Torefaksi: Optimasi Temperatur Torefaksi Simultan Berdasarkan Hasil Uji Temperatur Torefaksi Masing-Masing Komponennya, *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) XII*, Unila Bandar Lampung.
- Toto Hardianto, Dliya Izharul Haq, Nathanael P. Nadian, and Aryadi Suwono (2013): Study on Heat Treatment Characteristics of Rice (Starch) Component in Municipal Solid Waste during its Conversion to High Calorific Value Solid Fuel by using Torrefaction, *Proceedings of 8th International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion 2013*, Semarang, Indonesia.
- Toto Hardianto, Adrian Rizqi Irhamna, Amrul, and Aryadi Suwono (2013): Simultaneous Torrefaction Modeling of Municipal Solid Waste for High Calorific Value Solid Fuel, *Proceedings of 8th International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion 2013*, Semarang, Indonesia.
- Budi Herwanto, Adrian R. Irhamna, Pandji Prawisudha, and Toto Hardianto (2014): Metode Pengeringan Non-Termal untuk Meminimalisasi Kebutuhan Panas Proses Torefaksi Sampah Kota menjadi Bahan Bakar Padat, *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) XIII*, Universitas Indonesia, Depok.
- Muhammad Arif Susetyo and Toto Hardianto (2015): Feasibility Study of Municipal Solid Waste Gasification for Power Generation in Indonesia, *Proceedings of the 4th INDONESIA EBTKE – ConEx 2015, New Renewable Energy and Energy Conservation Conference & Exhibition*, Jakarta Convention Center, Jakarta.
- Toto Hardianto, San Sophak, and Adrian R. Irhamna (2017): Study of Cambodian Municipal Solid Waste Conversion to High Grade Solid Fuel By Torrefaction Process, *Proceedings of the 10th AUN/SEED-Net*

Regional Conference on Energy Engineering (RCEnE-2017), Yangon, Myanmar.

Toto Hardianto, Fajar Fathiawan Pambudi, and Adrian Rizqi Irhamna (2017): A Study on Lignin Characteristic as Internal Binder in Hot Briquetting Process of Organic Municipal Solid Waste, *Proceedings of The International Conference on Thermal Science and Technology (ICTST 2017)*, Bali, Indonesia.

Adrian Rizqi Irhamna, Toto Hardianto, and Arash Ilham Utama (2017): Study on the Potential of Starch as Natural Binders on Hot Briquetting Process to Convert Municipal Solid Waste into Solid Fuel, *Proceedings of The International Conference on Thermal Science and Technology (ICTST 2017)*, Bali, Indonesia.

Hardianto T., Prawisudha P., Suwono A. (2004): Steady-State Performance Simulation Of A Coal Drying Pilot Plant, *Preprints of The 5th International Conference and Exhibition on COALTECH 2004*, Presented, Kuala Lumpur, Malaysia.

T. Hardianto, P. Prawisudha, T. Novera, A. Suwono (2006): Experimental Study on Hot Binderless Briquetting of Indonesian Low Rank Coal, *Preprints of International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion 2006*, Jakarta, Indonesia.

T. Hardianto, A. Jauhary, P. Prawisudha, A. Suwono (2006): Development of Seven Ton per Hour Coal Upgrading Pilot Plant Based on CUT Process, *Preprints of International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion 2006*, Jakarta, Indonesia.

Haryadi, Aryadi Suwono, and Toto Hardianto (2006): Experimental Study on Continuous Fluidized Bed Drying of Peat, *Preprints of International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion 2006*, Jakarta, Indonesia.

Haryadi, T. Hardianto, A.D. Pasek, dan A. Suwono (2008): Heating Value Improvement of Palm Empty Fruit Bunch as Solid Fuel Through Torrefaction Process, *The 4th International Conference on Cooling and Heating Technologies (ICCHT2008)*, Jinhae City, Korea.

Haryadi, A. Suwono, T. Hardianto, dan A.D. Pasek (2009): Peningkatan Nilai Kalor Gambut sebagai Bahan Bakar Padat Melalui Proses Torefaksi, *Proceeding Dies Emas ITB 2009*, Bandung.

- Haryadi, T. Hardianto, A.D. Pasek, A. Suwono, R. Azhari, dan W. Adriansyah (2009): The AspenTM Software Simulation of a Peat torrefaction System Using RYield and SSplit Block as Reactor Model, *Proceedings of International Symposium on Sustainable Energy and Environmental Protection (ISSEEP) 2009*, Yogyakarta, Indonesia.
- Haryadi, T. Hardianto, A.D. Pasek, and A. Suwono (2009): Reaction Kinetics Modeling on the Decomposition Reaction of Peat Torrefaction Process, *Preprints of International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion 2009*, Tongyeong, Korea.
- W. Adriansyah, T. Hardianto, R. Azhari, and A. Suwono (2009): Commissioning of Seven Ton per Hour Coal Upgrading Pilot Plant Based on CUT Process, *Preprints of International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion 2009*, Tongyeong, Korea.
- T. Hardianto, Haryadi, W. Adriansyah, R. Azhari, A.D. Pasek, and A. Suwono (2009): The Simulation of a Laboratory Scale Peat Continuous Reactor Torrefaction System, *Preprints of International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion 2009*, Tongyeong, Korea.
- Haryadi, A. Suwono, T. Hardianto, dan A.D. Pasek (2010): Heating Value Improvement of Peat to Coal Level Through Torrefaction Process, *International Journal of Energy Machinery*, Vol. 3, No. 1, pp. 32-37 (2010.08), KOCEN, The Korean Society of Heat & Cold Energy Engineers.
- Haryadi, T. Hardianto, A.D. Pasek, A. Suwono (2010): The Development of Laboratory Scale Continuous Peat Torrefaction Reactor System, *Proceedings of the 5th International Conference on Cooling and Heating Technologies*, Bandung, Indonesia.
- Haryadi, Aryadi Suwono, Toto Hardianto, and Ari Darmawan Pasek (2011): Development of a Small Industrial Scale Torrefaction System to Improve Heating of Peat as Solid Fuel Equivalent to Coal, *Preprints of International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion 2011*, Zhengzhou, China.
- Toto Hardianto, Aryadi Suwono, Willy Adriansyah, Nathanael P. Tandian, dan Willem Lawrence (2012): Analisis Tentang Temperatur Pengeringan untuk Mendapatkan Hasil Terbaik dalam Proses *Coal Upgrading*

Technology (Cut), Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) XI, UGM Yogyakarta.

Adrian R. Irhamna, Pandji Prawisudha, Toto Hardianto, and Aryadi Suwono (2014): Proses Pembriketan Binderless Temperatur Rendah pada Batubara Muda Indonesia, *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) XIII*, Universitas Indonesia, Depok.

Toto Hardianto, Adrian Rizqi Irhamna, Pandji Prawisudha, dan Aryadi Suwono (2014): Investigation on Self-binding Agent in Low Rank Coal during Low Temperature Binderless Briquetting Process, *Proceedings of the 7th Regional Conference on Energy Engineering (RCEnE-2014)*, Thailand.

E. Hutrindo, T. Hardianto, and P. Prawisudha (2017): Implementation of Different Policy Strategies Promoting Waste to Energy: Impact Evaluation through System Dynamics Modeling Study Case: Bandung City, *Proceedings of The International Conference on Thermal Science and Technology (ICTST 2017)*, Bali, Indonesia.

T. Hardianto and E. Hutrindo (2018): Strategy to Achieve the National Emission Reduction Target in the Energy Sector, *Chapter 3 of the book entitled "Energy Models in Emerging Economies"*, with Editor: Sasi K Kottayil, Centre for Science and Technology of the Non-Aligned and Other Developing Countries (NAM S&T Centre), Daya Publishing House a division of Astral International PVT.LTD, New Delhi – 110 002, 2018.

Fajar F. Pambudi, Toto Hardianto, and Adrian R. Irhamna (2020): Compaction Characteristics of Binary Coal Mixtures During Binder Less Briquetting Process, *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, <https://doi.org/10.1080/19392699.2020.1823844>, online published.

Toto Hardianto, Adrian Rizqi Irhamna, Pandji Prawisudha, and Firman Bagja Juangsa (2022): Experimental study on the role of moisture in the cold binderless briquetting low-rank coal, *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, <https://doi.org/10.1080/19392699.2022.2136170>, online published.

M. A. A. Efendi; T. Hardianto; P. Prawisudha; and D. F. Umar (2023): Agricultural residues biomass as a solid fuel for co-combustion in Indonesia – A review; *AIP Conference Proceedings 2837, 030001 (2023)*; <https://doi.org/10.1063/5.0150445>; online published.

- Toto Hardianto; Ari Akbariyanto Wenas; and Firman Bagja Juangsa (2023): Upgrading process of palm empty fruit bunches as alternative solid fuel: a review; *Clean energy*, Volume 7, Issue 6, December 2023, Pages 1173-1188, <https://doi.org/10.1093/ce/zkad059>; online published.
- Muhammad A A Efendi; Toto Hardianto; and Pandji Prawisudha (2025): Wet torrefaction of Indonesian agricultural waste biomass: product evaluation and analysis of slaggingfouling potential; *Clean Energy*, Volume 9, Issue 3, June 2025, Pages 1–10; <https://doi.org/10.1093/ce/zkaf009>; online published.
- Muhammad Ade Andriansyah Efendi; Toto Hardianto; Pandji Prawisudha; and Firman Bagja Juangsa (2025): Conversion of Agricultural Waste into High-Rank Solid Fuel Through Sequential Wet and Dry Torrefaction Processes; *BioEnergy Research*, Volume 18, article number 41 (2025); Received: 11 November 2024/Accepted: 10 April 2025; <https://doi.org/10.1007/s12155-025-10839-7>; online published.

CURRICULUM VITAE



Nama : Prof. Dr. Ir. Toto Hardianto, DEA
Tempat/tgl lahir : Blora, 7 Juni 1960
Kel. Keahlian : Ilmu dan Rekayasa Termal
Alamat Kantor : FTMD ITB
Nama Istri : Dyah Kuswandari S.H.
Nama Anak : Rhonita Dea Andarini S.T., M.T.
Ardian Yudo Dewanto S.T., MBA

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- SD Demaan II Kudus, 1967-1972
- SMP Negeri I Kudus, 1973-1975
- SMA Negeri I Kudus, 1976-1979
- Sarjana Teknik Mesin, ITB, Bandung: 1979-1984
- Magister (Diplome d'Etude Aprovondis, DEA), Mecanique, Ecole Centrale de Lyon, Lyon, France, 1986-1988
- Doktor, Mecanique, Ecole Centrale de Lyon, Lyon, France, 1988-1992
- Program Profesi Insinyur, ITB, Bandung, 2019-2020

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

- Pembina Biro Rooster ITB, 1994 – 1998.
- Anggota Tim Inti pelaksanaan Ujian Masuk Perguruan Tinggi Negeri (UMPTN) Panitia Ujian Masuk Lokal Bandung, 1994 - 2005.
- Wakil Kepala Laboratorium Termodinamika Pusat Penelitian Antar Universitas Ilmu Rekayasa, 1998 – 2003.
- Kepala Laboratorium Termodinamika, 2003 – 2019.
- Manajer Sarana dan Prasarana Gedung Litbang Integrasi dan Aplikasi (PAU), 2008-2009.
- Anggota Tim Teknis Pemantau Pembangunan Fisik Kampus ITB, bagian Mekanikal, 2011-2013.
- Anggota Komisi Penelitian, Pengabdian Kepada Masyarakat, Inovasi dan kewirausahaan ITB, 2011-2015.

- Bagian Mekanikal pada Tim Teknis Desain dan Konstruksi, Pengelola Unit Implementasi Proyek Pengembangan ITB, 2011-2015.
- Anggota Tim Kurikulum FTMD ITB, 2013-2018.
- Penasehat Bidang Mekanikal pada Tim Pendamping DED Gedung Riset Energi dan Museum Energi & Mineral ITB, 2012-2013.
- Anggota Tetap Senat Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara ITB, 2013-2018.
- Anggota Tim Investigasi kebakaran Gedung/Ruangan Program Studi Teknik Industri ITB, 2013.
- Sekretaris Tim Reakreditasi Program Studi Magister Teknik Mesin, FTMD-ITB, 2015-2016.
- Anggota Tim Penyusun Rencana Strategis (Renstra) FTMD ITB 2016-2020.
- Anggota Tetap Senat Akademik ITB Wakil dari FTMD, 2016-2019.
- Koordinator Keamanan, Keselamatan Kerja dan Keterandalan Gedung Riset dan Inovasi, 2017-2019.
- Ketua Program Studi Doktorat (S3) pada tiga program studi FTMD-ITB: Teknik Mesin, Teknik Dirgantara, dan Ilmu dan Teknik Material, 2018-2020.
- Ketua Tim Kurikulum Program Studi Magister FTMD-ITB, 2018-2019.
- Anggota Komisi Program Pasca Sarjana (KPPs) FTMD ITB, 2018-2025.
- Ketua Tim Implementasi Proyek Revitalisasi Gedung Pusat Antar Universitas (PAU) dan Renovasi Sunken court ITB, 2023-2025.
- Ketua Tim Kerja Pembangunan Zona Integritas menuju Wilayah Bebas Korupsi (WBK) dan Wilayah Birokrasi Bersih dan Melayani (WBBM) FTMD-ITB, 2022-2025.

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

1. Pembina Utama Muda, IV/c, 1 April 2024
2. Pembina Tk.I, IV/b, 1 April 2011
3. Pembina, IV/a, 1 April 2009
4. Penata Tk.I, III/d, 1 Oktober 2000
5. Penata, III/c, 1 Oktober 1998
6. Penata Muda Tingkat 1, III/b, 1 Oktober 1995
7. Penata Muda, III/a, 1 Juli 1990
8. CPNS, 1 Januari 1986

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

1. Guru Besar, 1 Desember 2024
2. Lektor Kepala, 1 Februari 2009
3. Lektor, 1 Januari 2001
4. Lektor Madya, 1 Januari 2000
5. Lektor Muda, 1 Juni 1997
6. Asisten Ahli, 1 Mei 1995
7. Asisten Ahli Madya, 1 Maret 1993

V. KEGIATAN PENELITIAN (10 TAHUN TERAKHIR)

Sebagai Ketua Tim

Research Program of Dried-Lignite Briquetting, Penelitian atas kerjasama IHI Japan dan ITB, 2016-2018.

Pengembangan *Coal Upgrading Technology* (CUT) dengan Mengandalkan Proses Pengeringan Temperatur Rendah dan Pembriketan Cepat yang Memanfaatkan Efek Kandungan Air Sisa, Program Penelitian P3MI, KK-Konversi energi, FTMD, ITB, 2017.

“Pengembangan Model Sistem Pengelolaan Energi Nasional untuk Mencapai Ketahanan Energi, Kemandirian Energi, Berkelanjutan dan Kesepakatan Paris secara Simultan dan Seimbang Berbasis Dinamika Sistem” Penelitian untuk disertasi atas nama Erick Hutrindo, NIM 33115001, tahun 2017-2022.

Pengembangan Coal Upgrading Technology (CUT): Teknologi Pembriketan Temperatur Rendah Memanfaatkan Properti Mekanik Partikel Batubara, Program Penelitian P3MI, KK-Konversi energi, FTMD, ITB, 2018.

Pengembangan Menuju Bahan Bakar Padat Ramah Lingkungan: Prototipe Mesin Briket untuk Merealisasikan Metode Pembriketan Tanpa Perekat dari Luar (*Binderless Briquetting Method*), Program Penelitian P3MI, KK-Konversi energi, FTMD, ITB, 2019.

Kajian Pemanfaatan Limbah Pertanian Jagung sebagai Sumber Bahan Bakar Skala Komunal, Program Penelitian P3MI, KK-Konversi energi, FTMD, ITB, 2020.

Pengembangan dan Optimasi *Mobile Corn Dryer* (MCD), Program Penelitian dan Pengembangan bersama antara PT. Charoen Pokphand Indonesia TBK dan LPiK-ITB, 2020.

Penelitian dan Pengembangan *First Article Mobile Corn Dryer* (MCD), berdasarkan SK Rektor no. 005V/IT1.A/SK-KP/2022 tentang Tim Peneliti Pengembangan *First Article Mobile Corn Dryer* (MCD), tahun 2022.

“Pengembangan Mesin Stirling Termoakustik dengan Resonator Mekanik Membran dan Pelat”, Penelitian untuk disertasi atas nama Rachman Hakim, NIM 33120303, mulai tahun 2023 – Sekarang.

“Konversi Simultan Biomassa Limbah Multi Varian menjadi Bahan Bakar Padat Unggul melalui Metode Torefaksi Multi Proses dan Perumusan Sistem jaringan Spasial Biomassa Limbah untuk Pembakaran Kombinasi pada Pembangkit Daya melalui Simulasi Model Berbasis Agen Eksergetik”, Program kegiatan Penelitian, Pengabdian kepada Masyarakat dan Inovasi (PPMI), ADO LIT KK, tahun 2024.

“Finalisasi Formulasi Konversi Simultan Biomassa Limbah Multi Varian menjadi Bahan Bakar Padat Unggul melalui Metode Torefaksi Multi Proses dan Finalisasi Perumusan Sistem jaringan Spasial Biomassa Limbah untuk Pembakaran Kombinasi pada Pembangkit Daya melalui Simulasi Model Berbasis Agen Eksergetik”, Program kegiatan Penelitian, Pengabdian kepada Masyarakat dan Inovasi (PPMI), ADO LIT KK, tahun 2025.

Sebagai Anggota Tim

Research Program of Dried-Lignite Briquetting, Penelitian atas kerjasama IHI Japan dan ITB, 2013-2016.

Pengembangan Model Optimasi Penyediaan dan Pemanfaatan Energi Berbasis Sistem Dinamik untuk Menganalisis Ketercapaian Tujuan Kebijakan Energi Nasional, Program Penelitian P3MI, KK-Konversi energi, FTMD, ITB, 2017.

VI. PUBLIKASI (10 TAHUN TERAKHIR)

a. Publikasi Ilmiah Internasional

Toto Hardianto, A. Rizky Amalia, Aryadi Suwono, dan P. Riauwindu (2015): Study of Indonesia low rank coal utilization on modified fixed bed gasification for combined cycle power plant, *Online Journal of IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE)*, vol. 88, 21 September 2015, paper no. 012042.

Fajar F. Pambudi, Toto Hardianto, and Adrian R. Irhamna (2020): Compaction Characteristics of Binary Coal Mixtures During Binder Less Briquetting Process, *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, <https://doi.org/10.1080/19392699.2020.1823844>, online published.

Toto Hardianto, Adrian Rizqi Irhamna, Pandji Prawisudha, and Firman Bagja Juangsa (2022): Experimental study on the role of moisture in the cold binderless briquetting low-rank coal, *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, <https://doi.org/10.1080/19392699.2022.2136170>, online published.

Toto Hardianto; Ari Akbariyanto Wenas; and Firman Bagja Juangsa (2023): Upgrading process of palm empty fruit bunches as alternative solid fuel: a review; *Clean energy*, Volume 7, Issue 6, December 2023, Pages 1173-1188, <https://doi.org/10.1093/ce/zkad059>; online published.

Muhammad A A Efendi; Toto Hardianto; and Pandji Prawisudha (2025): Wet torrefaction of Indonesian agricultural waste biomass: product evaluation and analysis of slagging/fouling potential; *Clean Energy*, Volume 9, Issue 3, June 2025, Pages 1–10; <https://doi.org/10.1093/ce/zkaf009>; online published.

Muhammad Ade Andriansyah Efendi; Toto Hardianto; Pandji Prawisudha; and Firman Bagja Juangsa (2025): Conversion of Agricultural Waste into High-Rank Solid Fuel Through Sequential Wet and Dry Torrefaction Processes; *BioEnergy Research*, Volume 18, article number 41 (2025); <https://doi.org/10.1007/s12155-025-10839-7>; online published.

b. Publikasi Jurnal Nasional (terakreditasi)

Hendi Riyanto, Toto Hardianto, dan Willy Adriansyah, Gavriel Y. Jeffry (2021): Studi Termodinamika Pembakaran Kombinasi Batu bara dan Biomassa Limbah, *Jurnal Material dan Proses Manufaktur*, Vol. 5, No.2, p82-90, Desember 2021, <https://doi.org/10.18196/jmpm.v5i2.13903>, online published.

Ari Akbariyanto Wenas dan Toto Hardianto (2021): Pengaruh Torefaksi terhadap Pencucian Potassium dalam Konversi Tandan Kosong Kelapa Sawit menjadi Bahan Bakar Padat Ramah lingkungan, *Jurnal Material dan Proses Manufaktur*, Vol. 5, No.2, p123-140, Desember 2021, <https://doi.org/10.18196/jmpm.v5i2.14109>, online published.

c. Publikasi Prosiding Seminar

Muhammad Arif Susetyo and Toto Hardianto (2015): Feasibility Study of Municipal Solid Waste Gasification for Power Generation in Indonesia, *Proceedings of The 4th INDONESIA EBTKE – ConEx 2015, New Renewable Energy and Energy Conservation Conference & Exhibition*, Jakarta Convention Center, Jakarta.

Toto Hardianto, Adrian Rizqi Irhamna, Pandji Prawisudha, dan Aryadi Suwono (2015): Pengaruh Kandungan Air pada Proses Pembriketan Binderless Batubara Peringkat Rendah Indonesia, *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) XIV*, Universitas Lambung Mangkurat, Banjarmasin.

Muhammad Arif Susetyo ST, Dr. Ir Toto Hardianto, David Bahrin MT, and Prof.

Dr. Ir. Herri Susanto (2016): Dry Flue Gas Desulfurization for Power Generation, *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) XV*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.

Nguyen Truong Gia Tri, Muhammad Hafil Nugraha, Toto Hardianto, dan Hendi Riyanto (2016): Optimum Performance by Specific Fuel Consumption of the Combined Cycle Based on Intercooled – Reheat Gas Turbine Power Plants, *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) XV*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.

I. Aliman, S. Samnang, T. Hardianto, and H. Riyanto (2016): Thermal Efficiency Improvement to an Existing 420 MW Reheat–Regenerative Sub-critical Rankine Cycle by Rearrangement and Addition of Feedwater Heater System, *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) XV*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.

Adrian R. Irhamna, Pandji Prawisudha, dan Toto Hardianto (2016): Pengaruh Waktu Penyimpanan pada Proses Pembriketan Binderless Batubara Peringkat Rendah Indonesia, *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) XV*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.

Bagus Budiwantoro, Toto Hardianto, dan Bangsa Mahardika (2016): Modifikasi Submersible Dredge Pump Gearbox dengan Daya 1,25 MW, *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) XV*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.

M.A. Mahardika, S. Sophak, T. Hardianto, dan H. Riyanto (2016): Optimum of Reheat-Regenerative Super Critical Rankine Cycle Performance through the Application of Exergy Analysis and Pinch Technologie, *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) XV*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.

Ng.T.G. Tri, M.H. Nugraha, T. Hardianto, H. Riyanto (2016): Optimum Performance Based on Specific Fuel Consumption of the Intercooled – Reheat Gas Turbine Combined Cycle, *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) XV*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.

Muhammad Arif Susetyo ST, Dr. Ir Toto Hardianto, David Bahrin MT, and Prof. Dr. Ir. Herri Susanto (2016): Modelling of Dry Reagent for Dry Flue Gas Desulfurization, *Proceedings of International Seminar on Chemical Engineering in conjunction with Seminar Teknik Kimia Soehadi Reksowardojo (STKSR) 2016*, Bandung.

Kurnia Fajar, Diki Ismail Permana, Toto Hardianto, dan Hendi Rianto (2016): Modifikasi Heat Recovery Steam Generator (HRSG) Subkritik Menjadi Superkritik untuk Meningkatkan Efisiensi Sistem PLTGU di Indonesia,

- T. Hardianto and E. Hutrindo (2016): Strategy to Achieve the National Emission Reduction Target from the Energy Sector, *International Workshop on 'Evolving Energy Models in Emerging Economies – Post COP 21'*, Ahmadabad, Gujarat, India.
- Toto Hardianto, San Sophak, and Adrian R. Irhamna (2017): Study of Cambodian Municipal Solid Waste Conversion to High Grade Solid Fuel By Torrefaction Process, *Proceedings of The 10th AUN/SEED-Net Regional Conference on Energy Engineering (RCEnE-2017)*, Yangon, Myanmar.
- Toto Hardianto, Fajar Fathiawan Pambudi, and Adrian Rizqi Irhamna (2017): A Study on Lignin Characteristic as Internal Binder in Hot Briquetting Process of Organic Municipal Solid Waste, *Proceedings of The International Conference on Thermal Science and Technology (ICTST 2017)*, Bali, Indonesia.
- Adrian Rizqi Irhamna, Toto Hardianto, and Arash Ilham Utama (2017): Study on the Potential of Starch as Natural Binders on Hot Briquetting Process to Convert Municipal Solid Waste into Solid Fuel, *Proceedings of The International Conference on Thermal Science and Technology (ICTST 2017)*, Bali, Indonesia.
- E. Hutrindo, T. Hardianto, and P. Prawisudha (2017): Implementation of Different Policy Strategies Promoting Waste to Energy: Impact Evaluation through System Dynamics Modeling Study Case: Bandung City, *Proceedings of The International Conference on Thermal Science and Technology (ICTST 2017)*, Bali, Indonesia.
- M. A. A. Efendi; T. Hardianto; P. Prawisudha; and D. F. Umar (2023): Agricultural residues biomass as a solid fuel for co-combustion in Indonesia – A review; *AIP Conference Proceedings 2837, 030001 (2023)*; <https://doi.org/10.1063/5.0150445>; online published.

VII. Paten

1. Proses Pembuatan Bahan Bakar Padat dari Gambut Melalui Proses Torefaksi; atas nama Dr. Ir. Toto Hardianto, Ir. Haryadi M.T., dan Prof. Dr. Ir. Aryadi Suwono; diterbitkan Kementerian Hukum dan Hak Asasi manusia RI, Nomor Paten IDP000058703, Tanggal Pemberian 14 Mei 2019, jangka waktu 03 Februari 2010 - 03 Februari 2030.
2. Metode Pembuatan Bahan Bakar Padat Bernilai Kalor Tinggi dari Sampah Perkotaan Melalui Torefaksi Simultan dan Produk yang dihasilkan dengan Metode Tersebut; atas nama Dr. Ir. Toto Hardianto, Prof. Dr. Ir. Aryadi

Suwono, Prof. Dr. Ir. Ari Darmawan Pasek, dan Dr. Amrul, S.T., M.T, diterbitkan Kementerian Hukum dan Hak Asasi manusia RI, Nomor Paten IDP000067182, Tanggal Pemberian 10 Februari 2020, jangka waktu 01 Desember 2015 - 01 Desember 2035.

3. Metode dan Alat Sampling Partikel Debu Berdasarkan Diameter dan Waktu; atas nama Dr. Ir. T.A. Fauzi Soelaiman dan Dr. Ir. Toto Hardianto; diterbitkan Kementerian Hukum dan Hak Asasai manusia RI, Nomor Paten ID P0025717, Tanggal Pemberian 20 Mei 2010, jangka waktu 05 Februari 2003 - 05 Februari 2023.

VIII. PENGHARGAAN

1. Satyalancana Karya Satya X Tahun, Presiden Republik Indonesia, 2002.
2. Satyalancana Karya Satya XX Tahun, Presiden Republik Indonesia, 2010.
3. Lencana Pengabdian 25 Tahun Institut Teknologi Bandung, 2011.
4. Satyalancana Karya Satya XXX Tahun, Presiden Republik Indonesia, 2018.
5. Lencana Pengabdian 35 Tahun Institut Teknologi Bandung, 2021.
6. Penghargaan ITB Bidang Penelitian/Karya Inovasi Tahun 2023.
7. Penghargaan 103 Inovasi Paling Prospektif – 2011, dari Menteri Negara Riset dan Teknologi Republik Indonesia, untuk karya inovasi dalam bidang Energi: *Torefaksi Sampah Perkotaan Menjadi Bahan Bakar Padat Berkalori Tinggi*, dengan inovator: Prof. Dr. Ir. Aryadi Suwono, Dr. Ir. Ari Darmawan Pasek, Dr. Ir. Toto Hardianto, dan Amrul MT. dibukukan dalam buku: *103 Indonesia Innovations*, ISBN: 978-602-95290-2-9, diterbitkan oleh Business Innovation Center (BIC), Kementerian Riset dan Teknologi Republik Indonesia, 2011.
8. IPC-9 Prize Paper Award from IATO SAE Indonesia to Toto Hardianto as main author for the technical Competence displayed in the paper entitled *Study of Diesel Engine Emission Control by using Transfer Function as an Emission Sensor*, on the Ninth International Pacific Conference on Automotive Engineering (IPC-9), held in Nusa Dua, Bali, Indonesia, on November 16-21, 1997.
9. FTEC 2009 Best Paper Award from Organizing Committee of FTEC 2009 to T. Hardianto, Haryadi, W. Adriansyah, R. Azhari, A.D. Pasek, and A. Suwono for the Paper entitled *The Simulation of a Laboratory Scale Peat Continuous Reactor Torrefaction System*, presented at the International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion 2009, held in Tongyeong City, Korea, on December 7-10, 2009.

10. ICCHT 2010 Best Paper Award from Organizing Committee of ICCHT 2010 to Haryadi, A. Suwono, T. Hardianto, and A.D. Pasek for the Paper entitled *The Development of Laboratory Scale Continuous Peat Torrefaction Reactor System*, presented at The 5th International Conference on Cooling and Heating Technologies (ICCHT 2010), held in Bandung, Indonesia, on December 9-10, 2010.
11. FTEC 2011 Best Paper Award from Organizing Committee of FTEC 2011 to Nathanael P. Tandian, Efrizon Umar, Toto Hardianto, and Anggoro Septilarso for the Paper entitled *Theoretical Study of Natural Convective Heat Transfer in a Vertical Hexagonal Sub Channel*, presented at the International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion 2011, held in Zhengzhou, China, on September 24-27, 2011.
12. SNTTM XI Best Paper Award Bidang Konversi Energi dari BKSTM dan Jurusan Teknik Mesin dan Industri FT-UGM kepada Toto Hardianto, Aryadi Suwono, Willy Adriansyah, Nathanael P. Tandian, dan Willem Lawrence untuk makalah berjudul *Analisis Tentang Temperatur Pengeringan untuk Mendapatkan Hasil Terbaik dalam Proses Coal Upgrading Technology (Cut)*, yang dipresentasikan pada Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) XI, UGM Yogyakarta, 16 – 17 Oktober 2012.
13. Makalah Terbaik Bidang Konversi Energi pada SNTTM XII dari BKSTM dan Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung kepada Toto Hardianto, Aryadi Suwono, Ari Darmawan Pasek dan Amrul untuk makalah berjudul *Konversi Sampah Kota Menjadi Bahan Bakar Padat: Modifikasi Sistem Torefaksi Kontinu Unggun Terfluidisasi untuk Mengakomodasi Karakteristik Sampah*, yang dipresentasikan pada Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) XII, Unila Bandar Lampung, 23 – 24 Oktober 2013.



📍 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

Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id
Telp. (022) 2512532

🌐 fgb.itb.ac.id 📘 FgbItb 🐦 FGB_ITB
📱 @fgbitb_1920 📺 Forum Guru Besar ITB

