



**FORUM GURU BESAR**  
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



# **Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung**



## **DATA NUKLIR** **Teori Penunjang dan Aplikasinya**

**Profesor Rizal Kurniadi**

**Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Institut Teknologi Bandung**

**Aula Barat ITB  
12 Oktober 2024**



Orasi Ilmiah Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung

# **DATA NUKLIR**

Teori Penunjang dan Aplikasinya



Orasi Ilmiah Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung

# **DATA NUKLIR**

## Teori Penunjang dan Aplikasinya

**Prof. Rizal Kurniadi**

12 Oktober 2024  
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

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

*Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:*

***Data Nuklir: Teori Penunjang dan Aplikasinya***

Penulis : Prof. Rizal Kurniadi

Reviewer : Prof. Sidik Permana

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2024

ISBN : 978-623-297-585-9

e-ISBN : 978-623-297-586-6 (PDF)

**ITB PRESS**

📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,  
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132

☎ +62 22 20469057

🌐 [www.itbpress.id](http://www.itbpress.id)

✉ [office@itbpress.id](mailto:office@itbpress.id)

Anggota Ikapi No. 043/JBA/92  
APPTI No. 005.062.1.10.2018

# PRAKATA

Bismillaahirrahmaanirrahiim

Alhamdulillahirobbil 'aalamiin, segala puji dan syukur bagi Allah Swt., Tuhan Yang Maha Esa, Mahakuasa, serta pencipta dan pemilik alam semesta. Penulis bersyukur atas rahmat, karunia, dan izin-Nya sehingga dapat menyelesaikan buku orasi ilmiah. Penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan kepada Forum Guru Besar ITB atas kesempatan yang diberikan dalam penyusunan buku ini yang disampaikan dalam acara orasi ilmiah Guru Besar. Selain itu, penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan kepada seluruh pihak yang membantu dan mendukung penyelesaian karya ini.

Buku ini berisi tentang pengantar Data Nuklir, yaitu suatu pangkalan data dari besaran-besaran fisis yang diperoleh melalui eksperimen maupun teoretis. Besaran-besaran fisis yang dimaksud adalah besaran fisis dari struktur nuklir: konstanta peluruhan, tingkatan energi, waktu paruh, massa nuklir, jari-jari nuklir, potensial penghalang dan sebagainya; serta besaran fisis reaksi nuklir: penampang lintang reaksi fisi, penampang lintang reaksi fusi, produk fisi baik itu massa maupun muatan. Besaran fisis ini dievaluasi melalui pemodelan maupun melalui statistik. Teori tentang pemodelan baik itu untuk struktur ataupun reaksi menjadi tulang punggung dalam pembuatan pangkalan data ini.

Penulis berharap semoga buku ini dapat memberikan pengetahuan dasar tentang pangkalan data nuklir, sehingga bisa menjadi pendorong bagi para peneliti pemula di bidang fisika nuklir teoretis di Indonesia untuk ikut berkontribusi pada pengembangan pangkalan data nuklir yang pada akhirnya akan menunjang terbentuknya kepustakaan data nuklir Indonesia.

Bandung, 12 Oktober 2024

Prof. Rizal Kurniadi



# SINOPSIS

Data nuklir adalah pangkalan data yang sangat diperlukan bagi perkembangan sains dan teknologi nuklir. Begitu pentingnya pangkalan data ini, banyak peneliti-peneliti yang berfokus untuk terus melakukan penelitian dan pengembangan data tersebut, baik secara eksperimen maupun teoritik.

Buku ini membahas pengantar tentang data nuklir, diawali dengan penjelasan singkat terkait pangkalan data nuklir serta besaran-besaran fisis yang dimilikinya, dilanjutkan dengan pustaka-pustaka yang menjadi induk pangkalan data tersebut serta lembaga-lembaga yang menaunginya.

Pangkalan data ini dibangun melalui data-data yang diperoleh dari hasil eksperimen dan hasil teoritik. Oleh karenanya setelah mengulas dengan singkat tentang pustaka dan lembaga yang mewadahnya bab berikutnya dari buku ini adalah memaparkan tentang bahasan topik fisika nuklir yang menjadi kerangka teoretis untuk pemodelan dan evaluasi hasil eksperimen. Eksperimen sesungguhnya tidak bisa menutupi kebutuhan aplikasi secara menyeluruh, sehingga diperlukan cara lain untuk mendapatkannya. Cara tersebut dapat dipenuhi oleh evaluasi pemodelan dari data-data eksperimen yang terbatas. Dikarenakan luasnya cakupan aspek teoritik ini, maka evaluasi dan pemodelan teoritik tersebut dibagi menjadi dua bagian utama, yaitu struktur dan reaksi. Pembagian tersebut dilakukan mengacu pada pendekatan kuantum yang digunakan. Struktur menyandarkan pada keadaan terikat, sedangkan reaksi berlandaskan keadaan kontinu.

Pada bab terakhir akan diberikan berbagai aplikasi yang menggunakan jasa data nuklir ini. Seperti aplikasi pada kedokteran, pangan, industri, energi dan persenjataan. Bab tersebut menggambar secara singkat manfaat dan strategisnya data nuklir pada kehidupan sehari-hari. Secara umum keseluruhan aplikasi tersebut terbagi menjadi dua bagian besar, yaitu aplikasi dari radiasi dan energi, di akhir bab diulas secara singkat bagaimana prospek penggunaan reaksi fusi bagi kehidupan manusia.



# DAFTAR ISI

PRAKATA.....	V
SINOPSIS .....	VII
DAFTAR ISI.....	IX
DAFTAR GAMBAR .....	XI
1 APAKAH DATA NUKLIR.....	1
1.1 Nuclear Wallet Cards.....	2
1.2 NUDAT .....	3
1.3 MIRD (Medical Internal Radiation Dose) .....	4
1.4 ENSDF (Evaluated Nuclear Structure Data File) .....	5
1.5 NSR (Nuclear Sciences References).....	7
1.6 CINDA (Computer Index of Nuclear Reaction Data) .....	8
1.7 EXFOR (EXchange FORmat) .....	9
1.8 ENDF .....	12
2 ASPEK TEORETIS PENUNJANG DATA NUKLIR .....	19
2.1 Struktur Nuklir .....	19
2.1.1 Gaya Nuklir .....	20
2.1.2 Ukuran Nuklir .....	20
2.1.3 Momentum Sudut dan Paritas .....	21
2.1.4 Sifat Elektromagnetik.....	22
2.1.5 Model Inti .....	23
2.1.6 Model Kolektif.....	28
2.2 Reaksi Nuklir.....	32
2.2.1 Hamburan Elastik.....	34
2.2.2 Hamburan Non-elastik .....	35
2.2.3 Riset Orisinil .....	43
3 APLIKASI DATA NUKLIR .....	57
3.1 Kedokteran Nuklir .....	58
3.1.1 Onkologi .....	58
3.1.2 Teranostik.....	59
3.1.3 Neurologi.....	61
3.1.4 Kardiovaskular .....	61
3.1.5 Radiofarmasi.....	62
3.2 Pertanian .....	64
3.2.1 Studi Nutrisi Tanaman .....	64
3.2.2 Pengendalian Hama Serangga.....	66
3.2.3 Peningkatan Hasil Panen.....	67

3.2.3	Pengolahan dan Pengawetan Makanan.....	67
3.3	Radiografi Industri.....	69
3.3.1	Pengujian Nondestruktif .....	69
3.3.2	Pelacak Radioaktif .....	70
3.3.3	Modifikasi Material .....	72
3.3.4	Pengukuran Nukleonik .....	73
3.3.5	Energi .....	74
4	PENUTUP DAN RISET LANJUTAN .....	87
	UCAPAN TERIMA KASIH .....	89
	DAFTAR PUSTAKA .....	91
	CURRICULUM VITAE .....	95

# DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1</b>	Halaman website Nuclear Wallet Cards.....	2
<b>Gambar 2</b>	Sampel halaman data website Nuclear Wallet Cards .....	2
<b>Gambar 3</b>	Website NUDAT dari IAEA .....	3
<b>Gambar 4</b>	Tampilan data NUDAT.....	3
<b>Gambar 5</b>	<i>Output</i> MIRD .....	4
<b>Gambar 6</b>	<i>Output</i> MIRD dilengkapi dengan gambar skema peluruhan .....	5
<b>Gambar 7</b>	Alur kerja ENSDF .....	6
<b>Gambar 8</b>	Pangkalan data ENSDF .....	6
<b>Gambar 9</b>	Tampilan gambar data peluruhan dari pangkalan data ENSDF .....	7
<b>Gambar 10</b>	Hasil pengambilan informasi dari pangkalan data NSR.....	7
<b>Gambar 11</b>	Tampilan CINDA berbentuk kueri .....	8
<b>Gambar 12</b>	Hasil kueri CINDA untuk reaksi $^{55}\text{Mn}(n,p)$ .....	9
<b>Gambar 13</b>	Tampilan keluaran standar EXFOR dari file teks .....	11
<b>Gambar 14</b>	Tampilan keluaran standar EXFOR dalam bentuk gambar .....	11
<b>Gambar 15</b>	Siklus pada data nuklir .....	14
<b>Gambar 16</b>	Lingkup data nuklir dan aplikasinya .....	15
<b>Gambar 17</b>	Representasi skematis struktur cangkang dalam nukleus akibat potensial efektif harmonik.....	28
<b>Gambar 18</b>	Representasi skematis tingkatan energi dalam nukleus dari model kolektif.....	30
<b>Gambar 19</b>	Mode vibrasi nucleus .....	31
<b>Gambar 20</b>	Skema eksperimen reaksi nuklir.....	33
<b>Gambar 21</b>	Diagram ilustrasi reaksi nuklir .....	34
<b>Gambar 22</b>	Diagram ilustrasi reaksi nuklir secara lengkap.....	35
<b>Gambar 23</b>	Ilustrasi pengaruh puncak kurva pada proses deformasi inti ( Diambil dari <i>Physical Review C</i> 87 (2013): 054326.).....	39
<b>Gambar 24</b>	Skematik RNRM terhadap LDM (diambil dari 1984 <i>J. Phys. G: Nucl. Phys.</i> 10 933) .....	41
<b>Gambar 25</b>	(a) Ilustrasi distribusi partikel titik dalam inti atom, (b) ilustrasi untuk parameter $\mu$ .....	44

<b>Gambar 26</b>	Tumpang tindih dua distribusi fermi .....	45
<b>Gambar 27</b>	Padanan antara kurva fungsi distribusi dengan droplet .....	45
<b>Gambar 28</b>	Hasil fisi dari berbagai parameter perpindahan .....	46
<b>Gambar 29</b>	Hasil fisi dihasilkan dari berbagai jumlah peristiwa fisi .....	46
<b>Gambar 30</b>	Representasi evolusi tetesan dalam berbagai nilai parameter deformasi .....	49
<b>Gambar 31</b>	Tingkat Energi 238 U untuk (Baris Pertama) $\Gamma = 0,25$ , $\eta = 0,0$ (kiri), $0,25$ (tengah), dan $0,75$ (kanan), (Baris Kedua) $\Gamma = 0,5$ , $\eta = 0,0$ (kiri), $0,25$ (tengah), dan $0,75$ (kanan), (Baris Ketiga) $\Gamma = 0,75$ , $\eta = 0,0$ (kiri), $0,25$ (tengah), dan $0,75$ (kanan) .....	50
<b>Gambar 32</b>	Hasil perhitungan kerapat tingkat-tingkat energi .....	51
<b>Gambar 33</b>	Tinggi penghalang potensial dihitung dari pekerjaan ini untuk membandingkannya dengan data bagian dalam eksperimen.....	51
<b>Gambar 34</b>	Tinggi penghalang potensial dihitung dari pekerjaan ini untuk membandingkannya dengan data bagian luar eksperimen.....	52
<b>Gambar 35</b>	ilustrasi mode fisi yang dipertimbangkan dalam karya ini. Leher adalah penghubung antara dua bola inti. ....	55
<b>Gambar 36</b>	Produk fisi tersusun dari tiga saluran SL, ST1, ST2 .....	55
<b>Gambar 37</b>	Proses injeksi obat diagnostik radioaktif .....	60
<b>Gambar 38</b>	$^{90}\text{Y}$ -DOTATOC dan $^{177}\text{Lu}$ -DOTATATE keduanya disuntikkan ke pembuluh darah pasien secara simultan .....	60
<b>Gambar 39</b>	Pencitraan radiasi nuklir pada organ .....	62
<b>Gambar 40</b>	Obat radiofarmasi.....	63
<b>Gambar 41</b>	Metodologi pelacak radioaktif dan aspek-aspek yang saling terkait .....	71
<b>Gambar 42</b>	SysKon 50 (diambil dari World Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.9 No.2, April 2019) .....	74
<b>Gambar 43</b>	Skema atau diagram PWR (diambil dari wikipedia) .....	77
<b>Gambar 44</b>	Diagram atau skema BWR (dari wikipedia).....	78
<b>Gambar 45</b>	Diagram atau skema HTGR (dari wikipedia) .....	79
<b>Gambar 46</b>	Skema sederhana Little Boy (dari wikipedia) .....	83
<b>Gambar 47</b>	Skema sederhana Fat Man (dari Wikipedia).....	84

# 1 APAKAH DATA NUKLIR

Apa itu data nuklir? Data nuklir adalah hasil kuantitatif dari setiap penyelidikan ilmiah mengenai sifat material nuklir seperti data fisika nuklir, atau data konstanta nuklir (Firestone, 2003). Contoh data nuklir adalah penampang lintang, waktu paruh, mode peluruhan dan sifat radiasi peluruhan, sinar  $\gamma$  dari radionuklida. Data nuklir merupakan data yang sangat penting untuk berbagai aplikasi (Schwerer, 2007). Untuk aplikasi energi meliputi: energi fisi, teknologi reaktor fusi. Sedangkan untuk aplikasi non-energi meliputi: kedokteran nuklir, dan terakhir untuk analisis material dan pengendalian proses seperti: pengamanan, keselamatan radiasi, pengelolaan limbah, penelitian lingkungan, penelitian dasar (misalnya astrofisika nuklir) dan pendidikan.

Data nuklir ini dapat berupa basis data yang menyediakan nilai besaran fisis yang direkomendasikan untuk sifat struktur nuklir seperti mode peluruhan, energi level, waktu hidup, dan sifat radiasi, serta untuk penampang reaksi nuklir yang diinduksi partikel dan foto fisi nuklir. Pustaka data yang andal, terkini, dan terstruktur dengan baik sangat diperlukan tidak hanya bagi spesialis nuklir di berbagai bidang aplikasi, tetapi juga bagi peneliti fisika nuklir yang membutuhkannya. Melalui data-data ini peneliti dapat meningkatkan pengetahuan mereka dan merencanakan kegiatan masa depan yang dapat mengarah pada penemuan baru.

Pengumpulan, evaluasi, dan penyebaran data nuklir merupakan tugas berat yang bergantung pada kontribusi para ahli dalam ilmu dasar dan terapan dari seluruh dunia

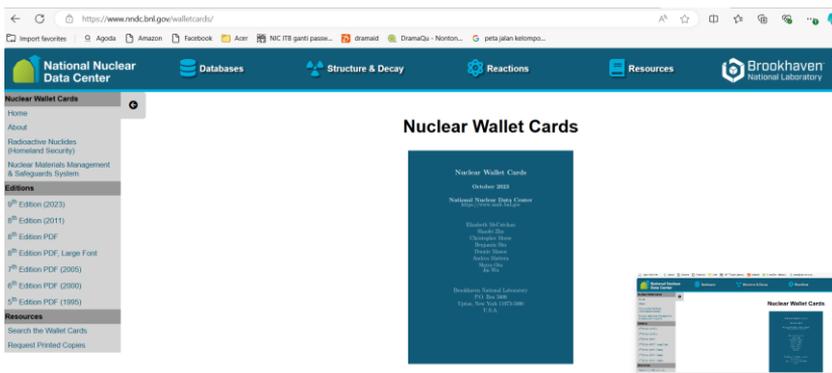
Organisasi internasional yang menyediakan data nuklir adalah IAEA – International Atomic Energy Agency. Bagian Data Nuklir dari IAEA bertanggung jawab dalam mengembangkan, memelihara, dan menyediakan akses gratis ke data nuklir melalui pangkalan data daring yang mudah digunakan. IAEA mendukung kegiatan penelitian nuklir di negara anggota dengan menyediakan data nuklir penting dan bertindak sebagai badan pusat untuk pengumpulan dan penyebaran data dari laboratorium di seluruh dunia

IAEA Nuclear Data Section (NDS) yang merupakan bagian Data Nuklir IAEA menyediakan layanan data nuklir kepada para ilmuwan di seluruh dunia seperti perpustakaan data, bibliografi, dan materi terkait. Data tersebut tersedia melalui Internet, CD-ROM dan media lainnya. Selain layanan tersebut

NDS juga menghasilkan pangkalan data baru melalui program pengembangan datanya. Secara politis NDS membantu negara-negara berkembang melalui kegiatan transfer teknologi. Upaya bersama oleh IAEA mencakup koordinasi kegiatan di negara anggota seperti EXFOR (Otuka, 2014) dan ENSDF (Tuli, 2001), implementasi proyek penelitian terkoordinasi (CRP), dan upaya yang telah menghasilkan perpustakaan data yang sangat berharga. Adapun kepustakaan utama yang dipertunjukkan untuk tujuan umum antara lain adalah Nuclear Wallet Cards (Tuli,2011), NUDAT (Dunford,1998), MIRD (Howell, 1999), ENSDF, NSR, CINDA , EXFOR, ENDF (Chadwick,2006).

## 1.1 Nuclear Wallet Cards

Sesuai dengan Namanya Nuclear Wallet Cards berisi kumpulan informasi sifat-sifat nuklida dalam keadaan dasar dan dalam keadaan meta-stabil, seperti tingkat-tingkat energi, spin, isospin, kelimpahan, mode peluruhan dsb.



Gambar 1 Halaman website Nuclear Wallet Cards

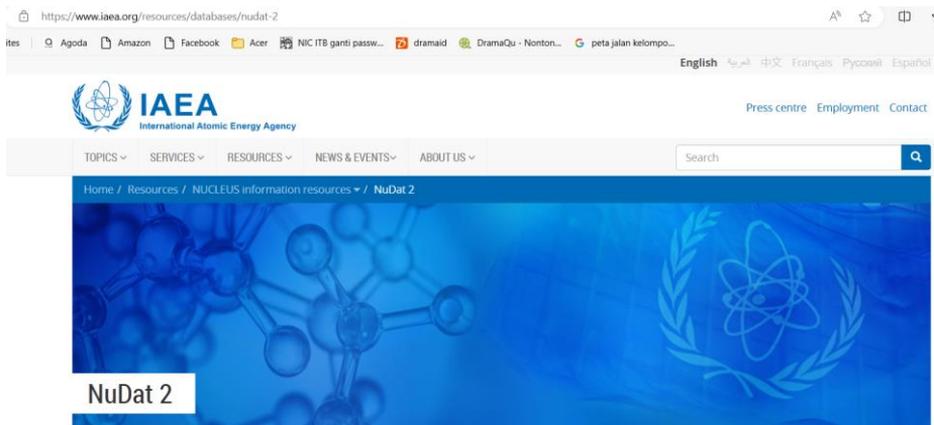
**Results for Z=26**

Nucleus	E(level) (MeV)	J $\pi$	$\Delta$ (MeV)	T <sub>1/2</sub>	Abundance	Decay Modes
<sup>45</sup> <sub>26</sub> Fe	0.0000	(3/2+)	13.5790 Syst	3.8 ms +20- $\delta$		2p
<sup>46</sup> <sub>26</sub> Fe	0.0000	0+	0.7550 Syst	12 ms +4-3		
<sup>47</sup> <sub>26</sub> Fe	0.0000		-6.6230 Syst	21.8 ms 7		$\epsilon$ : 100.00 % $\epsilon p$
<sup>48</sup> <sub>26</sub> Fe	0.0000	0+	-18.1600 Syst	44 ms 7		$\epsilon$ : 100.00 % $\epsilon p$ > 3.60 %
<sup>49</sup> <sub>26</sub> Fe	0.0000	(7/2-)	-24.5820 Syst	70 ms 3		$\epsilon$ : 100.00 % $\epsilon p$ $\approx$ 52.00 %
<sup>50</sup> <sub>26</sub> Fe	0.0000	0+	-34.4755	155 ms 11		$\epsilon$ : 100.00 % $\epsilon p$ $\approx$ 0.00 %
<sup>51</sup> <sub>26</sub> Fe	0.0000	5/2-	-40.2223	305 ms 5		$\epsilon$ : 100.00 %
<sup>52</sup> <sub>26</sub> Fe	0.0000	0+	-48.3316	8.275 h $\delta$		$\epsilon$ : 100.00 %
<sup>52m</sup> <sub>26</sub> Fe	6.8200	(12+)	-41.5116	45.9 s 6		$\epsilon$ : 100.00 %

Gambar 2 Sampel halaman data website Nuclear Wallet Cards

## 1.2 NUDAT

NuDat (Nuclear Structure and Decay Data) adalah perangkat lunak yang memungkinkan pengguna untuk mencari dan memetakan data struktur nuklir dan peluruhan nuklir secara interaktif. NuDat menyediakan antarmuka antara pengguna web dan beberapa basis data yang berisi informasi struktur nuklir, peluruhan nuklir, dan beberapa reaksi nuklir yang disebabkan neutron. Ada tiga formulir pencarian yang berbeda: satu untuk level dan gamma, yang kedua untuk informasi terkait peluruhan, dan yang ketiga untuk mencari berkas Nuclear Wallet Cards. NuDat dikembangkan oleh National Nuclear Data Center (NNDC).



Gambar 3 Website NUDAT dari IAEA

Address: [http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/adopted\\_search.jsp](http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/adopted_search.jsp)

**Gamma Information**

Nucleus	$E_{\text{level}}$ (keV)	J $\pi$	$T_{1/2}$	$E_{\gamma}$ (keV)	$I_{\gamma}$	$\gamma$ mult.	$\gamma$ mix. ratio	$\gamma$ conv. coeff.
<sup>60</sup> Ni	1332.518 5	2+	0.91 ps 2	1332.501 5	100	(E2)		
<sup>60</sup> Ni	2158.64 3	2+	0.59 ps 17	826.06 3	100.0 24	D+Q	+0.9 3	
<sup>60</sup> Ni	2158.64 3	2+	0.59 ps 17	2158.57 10	17.6 24	(E2)		
<sup>60</sup> Ni	2284.87 14	0+	> 1.5 ps	952.4 2	100			
<sup>60</sup> Ni	2284.87 14	0+	> 1.5 ps	2284.87		E0		
<sup>60</sup> Ni	2505.766 7	4+	3.3 ps 10	346.93 7	0.0076 5			
<sup>60</sup> Ni	2505.766 7	4+	3.3 ps 10	1173.237 4	100.00 2	E2(+M3)	-0.0025 22	
<sup>60</sup> Ni	2505.766 7	4+	3.3 ps 10	2505.766 7	2.0E-6 4	[E4]		
<sup>60</sup> Ni	2626.08 10	3+	≈ 0.6 ps	120.5 3	5.5 5			
<sup>60</sup> Ni	2626.08 10	3+	≈ 0.6 ps	467.3 2	100 5			
<sup>60</sup> Ni	2626.08 10	3+	≈ 0.6 ps	1293.7 2	53 5	D(+Q)	+0.02 +11-27	
<sup>60</sup> Ni	3119.70 9	4+	0.24 ps 10	493.90 20	8.7 22			
<sup>60</sup> Ni	3119.70 9	4+	0.24 ps 10	1787.20 10	100.0 22	Q(+O)	-0.16 +50-20	
<sup>60</sup> Ni	3124.02 13	2+	> 0.6 ps	497.9 2	3.68 20			

Gambar 4 Tampilan data NUDAT

### 1.3 MIRD (Medical Internal Radiation Dose)

Dosimetri radiasi menyediakan kuantitas dasar yang digunakan untuk perlindungan radiasi, penilaian risiko, dan perencanaan perawatan. Komite MIRD mengembangkan metode, model, asumsi, dan skema matematika standar untuk menilai dosis radiasi internal dari radiofarmasi yang diberikan. Pendekatan MIRD menyederhanakan masalah penilaian dosis untuk banyak radionuklida yang berbeda (masing-masing dengan karakteristik radiologis dan sifat kimianya yang unik sebagai senyawa berlabel) dalam lingkungan biologis yang sangat beragam yang diwakili oleh tubuh manusia, organ dalam, jaringan, kompartemen cairan, dan sel. Keunggulan pendekatan MIRD adalah pendekatan ini secara sistematis mengurangi analisis dosimetrik yang kompleks menjadi metode yang relatif mudah digunakan, termasuk perangkat lunak untuk penggunaan eksperimental dan klinis.

MIRD bekerja Berdasarkan ENSDF di mana data diproses dengan kode RADLST. *Input* kode berupa nuklida sedangkan *output*nya adalah tabel dengan intensitas, energi dan dosis semua radiasi yang dihasilkan, termasuk sinar X, elektron Auger, dan diagram skema peluruhan.



26-IRON-59

Half-life = 44.495 Days  
Decay Mode(s):  $\beta^-$

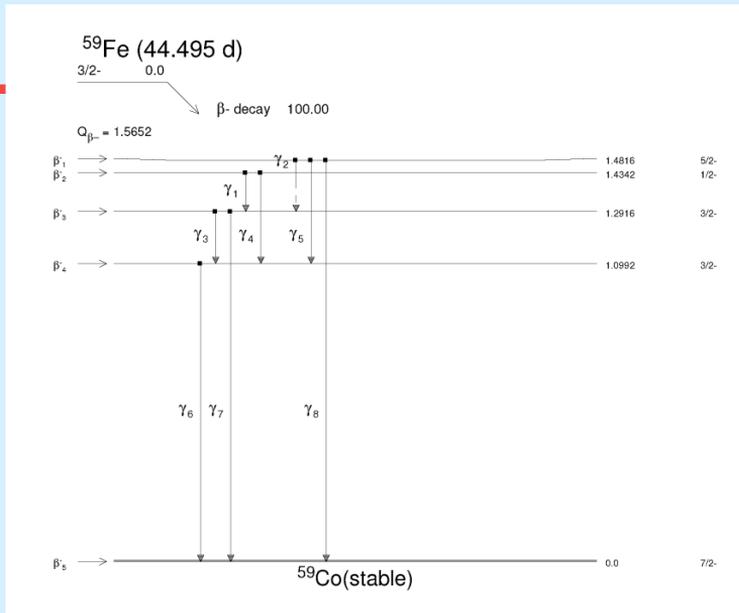
Apr-2002

RADIATIONS	$y(i)$ (Bq·s) <sup>-1</sup>	E(i) (MeV)	$y(i) \times E(i)$
$\beta^-$ 1	7.80E-04	2.208E-02 <sup>7</sup>	1.72E-05
$\beta^-$ 2	1.31E-02	3.574E-02 <sup>7</sup>	4.68E-04
$\beta^-$ 3	4.53E-01	8.101E-02 <sup>7</sup>	3.67E-02
$\beta^-$ 4	5.31E-01	1.493E-01 <sup>7</sup>	7.93E-02
$\beta^-$ 5	1.80E-03	6.146E-01 <sup>7</sup>	1.11E-03
$\gamma$ 1	1.02E-02	1.427E-01	1.46E-03
ce-K, $\gamma$ 1	1.50E-04	1.349E-01	2.02E-05
ce-L, $\gamma$ 1	1.51E-05	1.417E-01 <sup>8</sup>	2.14E-06
$\gamma$ 2	9.00E-06	1.890E-01	1.70E-06
$\gamma$ 3	3.08E-02	1.923E-01	5.92E-03
ce-K, $\gamma$ 3	2.51E-04	1.846E-01	4.63E-05
ce-L, $\gamma$ 3	2.49E-05	1.914E-01 <sup>8</sup>	4.78E-06
$\gamma$ 4	2.70E-03	3.348E-01	9.04E-04
ce-K, $\gamma$ 4	4.72E-06	3.271E-01	1.55E-06
ce-L, $\gamma$ 4	4.59E-07	3.339E-01 <sup>8</sup>	1.53E-07
$\gamma$ 5	1.80E-04	3.820E-01	6.88E-05
$\gamma$ 6	5.65E-01	1.099E+00	6.21E-01
ce-K, $\gamma$ 6	9.04E-05	1.092E+00	9.87E-05
$\gamma$ 7	4.32E-01	1.292E+00	5.58E-01
ce-K, $\gamma$ 7	4.75E-05	1.284E+00	6.10E-05
$\gamma$ 8	5.90E-04	1.482E+00	8.74E-04
K $\alpha_1$ X-ray	1.23E-04	6.930E-03	8.51E-07
K $\alpha_2$ X-ray	6.28E-05	6.915E-03	4.34E-07
K $\beta$ X-ray	2.55E-05	7.650E-03 <sup>7</sup>	1.95E-07
L X-ray	5.84E-06	7.800E-04 <sup>7</sup>	4.56E-09

Gambar 5 Output MIRD



MIRD  
Output  
("Medical  
Internal  
Radiation  
Dose")



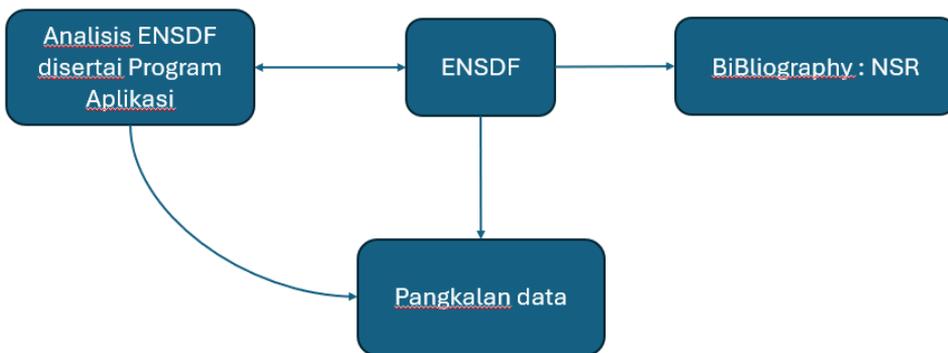
Gambar 6 Output MIRD dilengkapi dengan gambar skema peluruhan

## 1.4 ENSDF (Evaluated Nuclear Structure Data File)

ENSDF adalah pangkalan data yang berisi informasi struktur nuklir dan peluruhan yang dievaluasi untuk lebih dari 3.000 nuklida. Struktur nuklir merupakan bidang luas yang mencakup mulai dari pemahaman mikroskopis tentang sifat keadaan dasar dan keadaan tereksitasi berdasarkan potensial nukleon-nukleon yang realistis hingga model dengan derajat kebebasan yang efektif dan penerapannya pada ilmu astrofisika seperti aplikasi pada laju reaksi utama di sekitar bintang. Pembahasan struktur nuklir akan diulas pada bagian berikutnya.

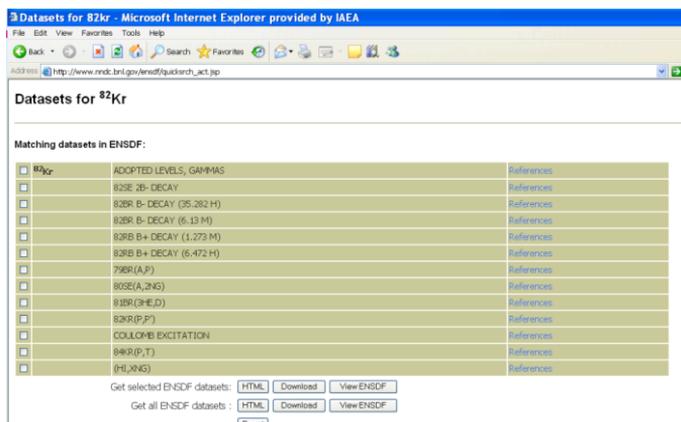
ENSDF berisi data yang telah dievaluasi untuk waktu paruh, sifat keadaan dasar dan tereksitasi dari semua nuklida dan karakteristik peluruhannya. Untuk setiap nuklida, semua data eksperimen yang diketahui yang digunakan untuk menyimpulkan informasi struktur nuklir disertakan. Setiap jenis eksperimen disajikan sebagai kumpulan data terpisah. Selain itu, ada kumpulan data level energi yang dimanfaatkan untuk sifat transisi sinar gamma. Evaluasi untuk mewakili penentuan nilai terbaik oleh evaluator terhadap sifat-sifat ini dilakukan berdasarkan semua data eksperimen yang tersedia. Dengan demikian, ENSDF adalah "master library" untuk struktur dan

data peluruhan. Untuk menjaga kualitas data maka evaluasi internasional dikoordinasikan oleh IAEA sedangkan berkas induk dikelola oleh US-NNDC. Jumlah nuklida yang dikelola hingga 3000 buah nuklida. Berikut ini diagram alur kerja dari ENSDF.



**Gambar 7** Alur kerja ENSDF

Induk ENSDF melakukan analisis melalui program-program aplikasi yang bersesuaian. Analisis berkembang sesuai dengan perkembangan penemuan-penemuan baru dari aspek teoritik seperti pemodelan dan *problem solving*. Apabila yang dihasilkan berupa data maka disimpan di pangkalan data ENSDF, sedangkan pemodelan dan Teknik *problem solving* disimpan di NSR (Nuclear Sciences References). Berikut ini pangkalan data ENSDF.



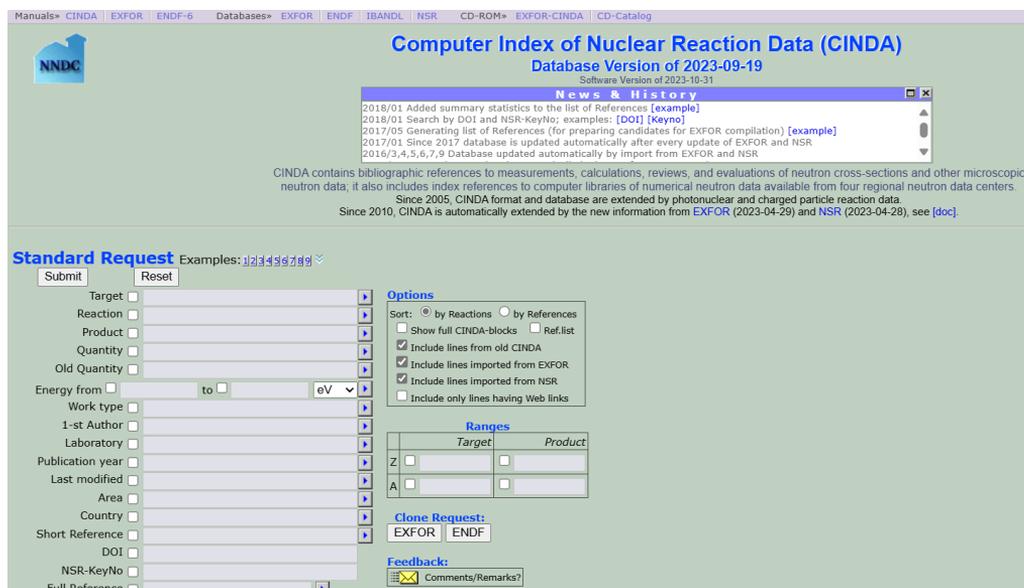
**Gambar 8** Pangkalan data ENSDF



## 1.6 CINDA (Computer Index of Nuclear Reaction Data)

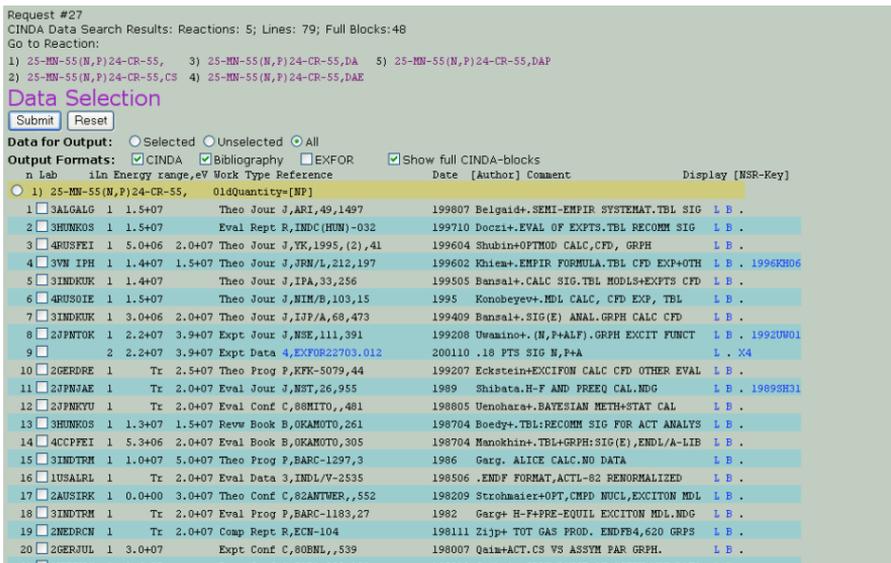
CINDA, berisi referensi bibliografi terhadap pengukuran, perhitungan, tinjauan, dan evaluasi penampang reaksi nuklir dan data reaksi nuklir mikroskopis lainnya, serta data fisi spontan. CINDA juga mencakup referensi indeks ke pustaka komputer data reaksi nuklir numerik. Entri kueri pada CINDA diurutkan berdasarkan nuklida, reaksi/kuantitas, dan laboratorium, oleh karena itu entri bersifat terpisah untuk setiap reaksi yang dapat terukur dari satu publikasi. Semua entri yang menggambarkan eksperimen yang sama dicantumkan secara bersama. Dokumen ini juga memuat referensi indeks ke pustaka komputer berisi data reaksi nuklir numerik yang tersedia dari Nuclear Reaction Data Centres Network (NRDC). CINDA disusun oleh NRDC di bawah naungan IAEA.

CINDA Dimulai pada tahun 1950-an sebagai indeks data neutron kemudian berkembang hingga saat ini diperluas ke data partikel bermuatan dan fotonuklir. Berikut ini tampilan dari CINDA.



Gambar 11 Tampilan CINDA berbentuk kueri

Untuk hasil kueri diperlihatkan pada gambar berikut.



Gambar 12 Hasil kueri CINDA untuk reaksi  $^{55}\text{Mn}(n,p)$

Beberapa pusat penelitian mengembangkan kueri CINDA untuk keperluan riset khusus yang dilakukannya.

## 1.7 EXFOR (EXchange FORmat)

Pangkalan data reaksi nuklir eksperimental EXFOR adalah repositori utama dunia untuk kompilasi data reaksi. Pustaka EXFOR didirikan pada tahun 1967 pada pertemuan empat pusat data nuklir utama: Laboratorium Nasional Brookhaven, Upton, NY, Bank Data Badan Energi Nuklir (NEA), Paris, Prancis. Badan Energi Atom Internasional, Wina, Austria, dan Institut Fisika dan Teknik Tenaga (IPPE), Obninsk, Uni Soviet. Proyek ini didasarkan pada upaya yang sudah ada sebelumnya, seperti Sistem Penyimpanan dan Pengambilan Informasi Pusat Sigma (SCISRS) pendahulu NNDC dan format terkait. Saat ini, proyek EXFOR merupakan kolaborasi internasional di bawah naungan Badan Energi Atom Internasional, dan 13 pusat data nuklir dari AS, OECD/Bank Data (Prancis), IAEA/NDS (Austria), Federasi Rusia, Tiongkok, Hongaria, India, Jepang, Kazakhstan, Korea, dan Ukraina secara teratur berkontribusi padanya.

Unit dasar EXFOR adalah entri yang berhubungan dengan satu eksperimen yang biasanya dijelaskan dalam satu atau lebih referensi bibliografi (artikel jurnal, laporan laboratorium, prosiding konferensi, dll.). Entri berisi data numerik dan definisinya sebagaimana diukur oleh penulis, beserta informasi bibliografi terkait dan deskripsi singkat tentang metode eksperimen. Entri biasanya dibagi dalam beberapa subentri yang berisi berbagai tabel data yang dihasilkan dari eksperimen.

Tidak seperti sistem bibliografi, EXFOR terutama berorientasi pada pekerjaan, bukan berorientasi pada publikasi, dan berisi banyak data yang belum pernah dipublikasikan dalam bentuk numerik, dan diperbarui secara berkala. Data ini berupa data nuklir numerik dengan referensi silang ke publikasi terkait. Data numerik dalam EXFOR dilengkapi dengan teks penjelasan yang memberikan informasi penting tentang makna dan kualitas data termasuk ringkasan tentang teknik pengukuran, koreksi dan analisis kesalahan, nilai referensi standar yang digunakan, dll..

EXFOR juga berisi data numerik yang didigitalkan dari hasil yang diterbitkan hanya dalam bentuk grafik serta dari data tabulasi asli yang tidak dapat diperoleh dari penulis. Data dirancang agar fleksibel, untuk memenuhi beragam kebutuhan pusat data reaksi nuklir, dan memungkinkan penyusunan berbagai jenis kuantitas sekaligus memungkinkan pemrosesan data terkomputerisasi. Kompilasi dilakukan sebisa mungkin mengikuti representasi penulis tentang kuantitas dan unit data yang awal diterbitkannya, untuk menghindari kesalahan selama input data dan untuk memudahkan perbandingan dengan publikasi asli. Oleh karena itu, pemrosesan dan pembuatan grafik dari data terkomputerisasi tidak menggunakan format dasar tetapi salah satu format komputasi yang tersedia yang ditawarkan sebagai opsi keluaran tambahan dalam sistem pengambilan pusat data. Berikut Tampilan format standat EXFOR.

```

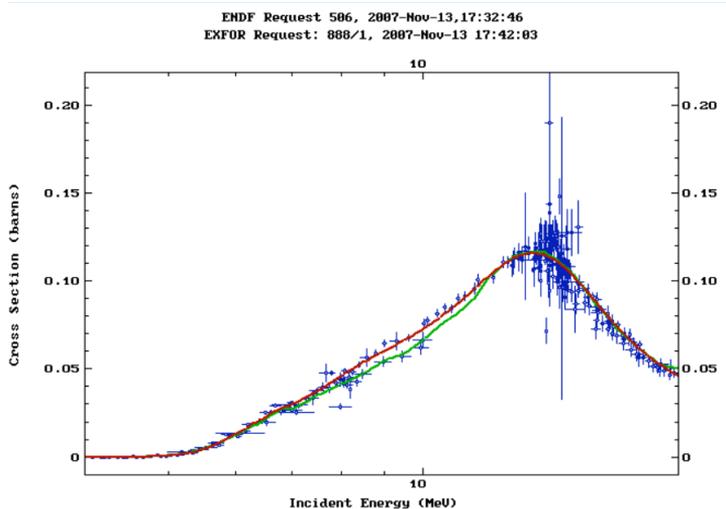
e30670.txt - WordPad
File Edit View Insert Format Help
[Icons]

SUBENT      30670002      840912      30670002      1
BIB          2          4          30670002      2
REACTION    (94-PU-239(N,F),,SIG)  30670002      3
STATUS      DATA FROM YUAN HAN-RONG AS PRIV.COMM.,83/12/07, WHICH  30670002      4
            CORRESPOND TO THE CURVE (FIG 4) OF CHINESE J.OF NUCL.  30670002      5
            PHYS.,4,(2) (1982)131.  30670002      6
ENDEBIB     4          30670002      7
NOCOMMON    0          0          30670002      8
DATA        3          16          30670002      9
EN          DATA      DATA-ERR  30670002     10
HRV         B          B          30670002     11
1.0000E+00  1.8600E+00  5.2000E-02  30670002     12
1.2000E+00  1.8760E+00  5.3000E-02  30670002     13
1.4000E+00  1.9840E+00  5.6000E-02  30670002     14
1.6000E+00  1.9580E+00  5.5000E-02  30670002     15
3.4000E+00  1.8520E+00  5.1000E-02  30670002     16
3.6000E+00  1.8240E+00  5.1000E-02  30670002     17
3.8000E+00  1.8250E+00  5.1000E-02  30670002     18
4.0000E+00  1.7960E+00  5.0000E-02  30670002     19
4.2000E+00  1.7810E+00  5.0000E-02  30670002     20
4.4000E+00  1.7670E+00  4.0000E-02  30670002     21
4.6000E+00  1.7560E+00  4.0000E-02  30670002     22
4.8000E+00  1.6980E+00  4.7000E-02  30670002     23
5.0000E+00  1.6960E+00  4.7000E-02  30670002     24
5.2000E+00  1.6640E+00  4.6000E-02  30670002     25
5.4000E+00  1.6600E+00  4.6000E-02  30670002     26
5.6000E+00  1.6830E+00  4.7000E-02  30670002     27
ENDDATA     18          30670002     28
ENDSUBENT   3          306700029999

PHYSENT     1          0          16  1.0000E+06  5.6000E+06  1  0  0
0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  1  1  0
1.0000E+06  0.0000E+00  0.0000E+00  1.8600E+00  5.2000E-02  5.2000E-02  1  1  1
1.2000E+06  0.0000E+00  0.0000E+00  1.8760E+00  5.3000E-02  5.3000E-02  1  1  1
1.4000E+06  0.0000E+00  0.0000E+00  1.9840E+00  5.6000E-02  5.6000E-02  1  1  1
1.6000E+06  0.0000E+00  0.0000E+00  1.9580E+00  5.5000E-02  5.5000E-02  1  1  1

```

Gambar 13 Tampilan keluaran standar EXFOR dari file teks



Gambar 14 Tampilan keluaran standar EXFOR dalam bentuk gambar

## 1.8 ENDF

Sejarah berdirinya ENDF adalah adanya kebutuhan file bersama antara sistem-sistem yang sudah ada, yang akan memungkinkan untuk saling membandingkan di antara pustaka-pustaka. Dorongan untuk menginisiasi datang dari sebuah diskusi antara Henry Honeck dari Laboratorium Nasional Brookhaven, Al Henry dari Westinghouse, dan George Joanou dari General Atomics di Colony Restaurant di Washington, D.C. Selanjutnya Divisi Matematika dan Komputasi Reaktor (RMC) dari American Nuclear Society (ANS) diminta untuk mensponsori dua pertemuan untuk membahasnya sebagai hasil dari diskusi di atas. Honeck sebagai ketua subkomite Divisi tentang File Data Nuklir yang terevaluasi (ENDF) mengadakan beberapa pertemuan. Sekelompok delapan belas perwakilan dari lima belas laboratorium AS bertemu di New York City pada tanggal 19 Juli 1963 meninjau pustaka lintas bagian dan membahas cara untuk saling menukar pustaka-pustaka ini. Selanjutnya sebuah subkomite ditunjuk untuk bertemu di Hanford pada tanggal 18-20 September 1963 untuk memeriksa format pustaka secara lebih rinci.

Kesimpulan dari diskusi ini adalah bahwa diperlukan format standar untuk data nuklir yang dievaluasi dan format tersebut harus sefleksibel mungkin sehingga pustaka yang ada dapat diterjemahkan ke dalam format standar dan akan sesuai dengan kebutuhan di masa mendatang yang dapat dengan mudah dimasukkan ke dalam file. Format standar ini akan berfungsi sebagai penghubung antara pustaka data dan kode pemrosesan.

Selain itu, disarankan juga agar dibentuk suatu pusat yang bertanggung jawab atas pengembangan dan pemeliharaan Berkas Data Nuklir yang Dievaluasi (ENDF) yang disertai dengan pengumpulan dan pendistribusian data.

Peneliti disain reaktor menginginkan adanya data yang dievaluasi untuk semua reaksi yang diinduksi neutron dalam rentang energi neutron yang luas untuk setiap material dalam reaktor. Akan tetapi, untuk material tertentu evaluator biasanya hanya menyediakan bagian kecil yang akan disatukan untuk membentuk satu set yang terevaluasi sepenuhnya. Untuk itulah ENDF/A menyediakan sistem penyimpanan untuk bagian kecil tersebut.

Selain kebutuhan untuk memungkinkan semua evaluasi data nuklir ditempatkan pada pangkalan yang sama, ada juga kebutuhan untuk file data nuklir yang dievaluasi khusus untuk digunakan untuk perhitungan desain reaktor. Deskripsi untuk kebutuhan hal tersebut tersedia pada ENDF/B.

Jika format ENDF/A sangat fleksibel untuk menerima data dalam hampir semua pengaturan atau penyajian, format ENDF/B harus sesederhana mungkin agar memudahkan penulisan kode program pemrosesan. Format pustaka ENDF/B yang baru ini akan sangat ketat secara matematis, dengan skema interpolasi khusus antara titik-titik yang ditabulasi, sehingga menyeluruh, produk, dan rasio penampang akan menghasilkan hasil yang terdefinisi dengan baik dan dapat diulang. Akan ada kode yang dikembangkan untuk membuat plot, integrasi, dan pemrosesan penampang lainnya yang akan ditulis dalam FORTRAN agar dapat dipertukarkan dan didistribusikan untuk membantu orang lain yang ingin menggunakan data ENDF. ENDF ini khususnya ENDF-6, digunakan untuk perpustakaan dari JEFF, BROND, JENDL, CENDL dan lain-lain

Proyek Joint Evaluated Fission and Fusion (JEFF) merupakan upaya kolaboratif di antara negara-negara anggota Bank Data Badan Energi Nuklir (NEA) OECD untuk mengembangkan pustaka data nuklir referensi. Pustaka JEFF berisi serangkaian data nuklir yang dievaluasi, terutama untuk aplikasi fisi dan fusi; pustaka ini berisi sejumlah jenis data yang berbeda, termasuk data interaksi neutron dan proton, data peluruhan radioaktif, hasil fisi, dan data hamburan termal.

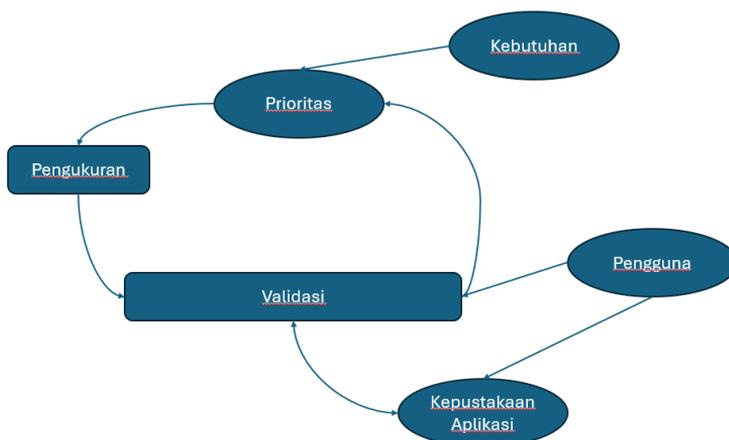
BROND (Biblioteka Rekomendovannykh Ocenennykh Nejtronnykh Dannykh - Library of Recommended Evaluated Neutron Data) adalah pustaka data nuklir yang dimiliki oleh Russia. Tidak banyak informasi terkait pustaka ini. Akan tetapi BROND melakukan koneksi data dengan pustaka data nuklir yang lain.

JENDL (Japanese Evaluated Nuclear Data Library) dirilis sebagai versi pertama (JENDL-1) pada tahun 1977. Versi terbaru adalah JENDL-5 yang dirilis pada tahun 2021 yang berisi data nuklir 795 nuklida untuk reaksi yang diinduksi neutron. File data seperti JENDL-5 disebutkan sebagai file untuk hal umum yang menyediakan berbagai jenis data untuk bidang aplikasi yang cukup luas. Selain itu terdapat juga file untuk hal khusus yang hanya berisi data yang dibutuhkan dalam bidang aplikasinya. Untuk JENDL-5 data reaksi

neutron sebagian besar ditingkatkan, dan diperluas dalam energi partikel datang. Pada versi terakhir ini, partikel bermuatan dan reaksi yang diinduksi foton dan data aktivasi neutron dimasukkan. Selanjutnya data untuk hamburan neutron termal, hasil produk fisi, peluruhan nuklir diperbarui sepenuhnya.

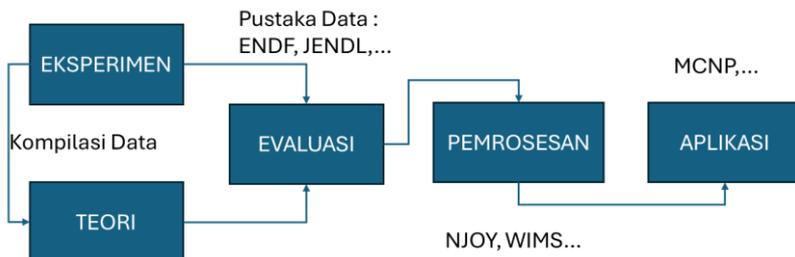
CENDL (Chinese Evaluated Neutron Data Library) adalah pustaka Data Neutron Terevaluasi Tiongkok diterbitkan tahun 1991, diperbarui dan ditambah tahun 1993 dan 1995. Pustaka ini berformat ENDF-6 dan memuat data untuk 67 materi dari  $^1\text{H}_1$  hingga  $^{98}\text{Cf}_{249}$ . Pustaka Data Nuklir CENDL versi terakhir adalah CENDL-3.1 yang didasarkan pada evaluasi data nuklir terkini oleh Pusat Data Nuklir Tiongkok (CNDC) bekerja sama dengan Jaringan Koordinasi Data Nuklir Tiongkok (CNDCN). CENDL-3.1 mencakup data yang dievaluasi untuk reaksi yang diinduksi oleh neutron dengan energi hingga 20 MeV pada 240 nuklida (dari  $\text{H}_1$  hingga  $\text{Cf}_{249}$ ). Semua data ini diperoleh menurut evaluasi data eksperimen dan prediksi teoretis. Validitas nuklida terpenting dalam pustaka ini telah diverifikasi dengan melakukan uji eksperimen. Baik data CENDL-3.1 saat ini maupun hasil benchmarking-nya telah dibandingkan dengan pustaka evaluasi lainnya secara individual. Selain itu, sebagian data tersebut telah diperiksa.

Data nuklir merupakan kumpulan data yang diperoleh melalui eksperimen dan teoritik. Hasil paduan berupa proses evaluasi ini dilanjutkan untuk digunakan pada berbagai kepentingan lain yang terkait padanya. Siklus data diperlihatkan pada gambar berikut.



Gambar 15 Siklus pada data nuklir

Diawali oleh kebutuhan, selanjutnya disusun prioritas. Apabila prioritas sudah dipetakan barulah dimulai pengukuran yaitu berupa kegiatan eksperimental. Melalui perhitungan teoritik dilakukan validasi yaitu perbandingan antara nilai eksperimental dengan nilai teoritik. Langkah ini dilakukan untuk melengkapi data-data yang tidak diukur. Hasil dari validasi selanjutnya mengalir menjadi kepustakaan untuk aplikasi. Pada tahap validasi, pengguna berperan menjadi kontrol baik sebagai masukan untuk proses validasi maupun untuk aplikasi kepustakaan. Selain itu hasil validasi ini pun menjadi masukan untuk prioritas dalam pengukuran. Melalui model teoritik dapat diprediksi kedepan, sehingga bisa menjadi bahan masukan dalam menentukan pola prioritas ke depannya. Lingkup data nuklir hingga aplikasi dapat diperlihatkan melalui Gambar 16 berikut.



**Gambar 16** Lingkup data nuklir dan aplikasinya

Gambar 16 memperlihatkan alur informasi, dimulai dari eksperimen. Melalui eksperimen ini dihasilkan informasi berupa data-data besaran fisis yang diperlukan. Mengingat data eksperimen yang terbatas sedangkan data yang dibutuhkan cukup luas maka selanjutnya dibangun teori untuk melengkapinya. Pemodelan teori mengikuti mekanisme yang terjadi pada eksperimen. Dengan kata lain pemodelan ini harus merespresentasikan dengan baik gambaran peristiwa dari sebuah eksperimen. Sebagai contoh, eksperimen yang di setting adalah reaksi fisi nuklir, maka pemodelan yang dibangun adalah model fisi inti. Apabila fisi yang terjadi pada eksperimen disertai dengan radiasi “sinar” radioaktif maka pemodelan fisi yang digunakan lebih spesifik lagi yaitu reaksi *cascaded model*, yaitu suatu reaksi berjenjang, diawali oleh sebuah reaksi dilanjutkan dengan reaksi berikutnya hingga selesai.

Sebagaimana yang telah dipaparkan sebelumnya bahwa data nuklir adalah parameter yang diperlukan untuk memodelkan fisika nuklir dari suatu

proses terapan atau industri untuk memberikan kuantitas yang relevan bagi aplikasi rekayasa. Jumlah parameter dibuat sekecil mungkin akan tetapi tetap mempertahankan fisiknya meskipun belum tentu menopang semua konsep fisika yang ada. Model dibuat sesederhana mungkin agar mudah digunakan. Selanjutnya model harus sesuai dengan pengukuran yang dilakukan dengan landasan teori yang digunakannya.

Untuk mendukung evaluasi data hasil eksperimen maka diperlukan pemodelan yang sesuai. Pemodelan dapat dibagi menjadi dua katagori besar, yaitu pemodelan struktur inti dan pemodelan reaksi inti. Pemodelan struktur umumnya model keadaan terikat- *bound states* sedangkan pemodelan reaksi umumnya model keadaan bebas-*unbound states*. Kedua model ini menjadi tantangan tersendiri ketika keadaan terikat menyatu dengan keadaan tak terikat.

Setelah dilakukan validasi yang berlanjut ke evaluasi kemudian aliran data akan menjadi masukan untuk tahap pemrosesan. Tahap pemrosesan adalah tahap terpenting untuk aplikasi atau penerapan. Pada pemrosesan, data-data tersebut akan diperkaya dengan informasi yang diperlukan untuk aplikasi.

Sistem Pemrosesan Data Nuklir NJOY digunakan untuk mengonversi data nuklir yang dievaluasi dalam format ENDF ke dalam bentuk yang berguna untuk aplikasi. Sebagai jembatan antara fisika dan teknik, sistem ini paling baik digunakan oleh orang-orang yang memiliki pengetahuan tentang hal-hal seperti teori reaksi nuklir, teori resonansi, atau teori hamburan di satu sisi, dan pengetahuan tentang hal-hal seperti kode transport partikel, perhitungan inti reaktor, atau pengobatan radiasi di sisi lain. Meskipun NJOY awalnya dirancang untuk bekerja dengan pustaka ENDF/B, sekarang NJOY menyediakan kemampuan universal untuk bekerja dengan pustaka data nuklir di seluruh dunia.

Sistem ini adalah kode komputer modular yang dirancang untuk membaca data yang dievaluasi dalam format ENDF, mengubah data dalam berbagai cara, dan mengeluarkan hasilnya sebagai pustaka yang dirancang untuk digunakan dalam berbagai aplikasi. Setiap modul menjalankan tugas pemrosesan yang terdefinisi dengan baik. Modul-modul tersebut pada dasarnya adalah program independen, dan mereka berkomunikasi satu sama lain menggunakan berkas masukan dan keluaran, ditambah beberapa variabel umum.

NJOY sekarang dan selanjutnya terus mengalami perubahan. Dengan beralih dari struktur modul NJOY lama ke perangkat berbasis komponen untuk NJOY modern, maka dapat memungkinkan penyebaran perangkat yang lebih cepat dan integrasi pada perangkat lain. Menyediakan antarmuka C++ dan Python secara bersamaan juga akan membantu dalam penyebaran perangkat ini lebih cepat. Setelah semua komponen yang diperlukan dikembangkan dengan cara ini maka padanan modern dari modul NJOY lama apa pun akan relatif mudah dicapai. Prototipe tersebut bahkan dapat dikembangkan dalam Python sebelum mempertimbangkan implementasinya di dalam C++. Dengan adanya lapisan antar muka NJOY ini maka data-data dari pustaka data nuklir dapat digunakan dalam aplikasi, sebagai contoh aplikasi MCNP (Monte Carlo N-Particles)( Briesmeister, 2000).

MCNP adalah kode Monte Carlo N-Particle serba guna (Brown, F. P, 2002) yang dapat digunakan untuk neutron, foton, elektron, atau transportnya yang digabungkan, termasuk kemampuan untuk menghitung nilai eigen untuk sistem kritis. Kode MNCP ini mampu menangani konfigurasi tiga dimensi sembarang material dalam sel geometris yang dibatasi oleh torus elips berderajat pertama dan kedua. Pada MNCP, data penampang melintang titik per titik digunakan secara simultan sehingga semua reaksi yang diberikan dalam evaluasi penampang lintang diperhitungkan. Khusus untuk neutron termal MNCP mengadopsi model gas bebas dan S-Matriks. Sedangkan untuk foton, kode tersebut memperhitungkan hamburan inkoheren dan koheren yang memungkinkan terbentuknya emisi fluoresensi setelah penyerapan fotolistrik, penyerapan produksi berpasangan dengan emisi lokal radiasi pemusnahan, dan bremsstrahlung. Model perlambatan berkelanjutan digunakan untuk transpor elektron yang mencakup positron, sinar-x, dan bremsstrahlung tetapi tidak mencakup medan eksternal atau medan yang diinduksi sendiri. Fitur standar penting yang membuat MCNP sangat serba guna dan mudah digunakan meliputi sumber umum yang tangguh, sumber kekritisasi, dan sumber permukaan, baik plotter penghitungan geometri maupun keluarannya, kumpulan teknik pengurangan variansi yang lengkap; struktur penghitungan yang fleksibel; serta kumpulan data penampang yang luas.



## 2 ASPEK TEORETIS PENUNJANG DATA NUKLIR

Penekanan utama dari Nuclear Data Research adalah pada data struktur dan peluruhan nuklir, dan aplikasinya dalam penelitian fisika nuklir seperti reaksi nuklir baik fisi maupun fusi, dan dalam teknologi nuklir terapan. Data yang dikompilasi dan dievaluasi disediakan untuk Nuclear Data Center (NDC) untuk dimasukkan ke dalam pangkalan data atau hasilnya dipublikasikan langsung dalam jurnal ilmiah yang ditinjau sejawat. Kontribusi juga diberikan ke berbagai pangkalan data khusus yang melayani kebutuhan khusus di bidang struktur nuklir, astrofisika nuklir, dan fisika nuklir terapan. Upaya ini mencakup evaluasi massa atom dan data struktur nuklir komplementer untuk pangkalan data Atomic Mass Evaluation (AME) (Audi, 2013) dan NUBASE (Audi, 2003), dan kompilasi data struktur nuklir. Pengukuran yang ditujukan untuk memberikan jawaban atas pertanyaan-pertanyaan tertentu dan untuk meningkatkan kualitas pangkalan data juga dilakukan.

### 2.1 Struktur Nuklir

Inti atom atau nukleus bukanlah objek tunggal, melainkan kumpulan objek mulai dari hidrogen hingga aktinida, dan memperlihatkan berbagai fenomena yang sangat kaya dan menarik. Nukleus sangat kecil, yaitu berdiameter sekitar  $10^{-12}$  hingga  $10^{-13}$  cm, dan dapat berisi hingga beberapa ratus proton dan neutron yang mengorbit relatif satu sama lain dan berinteraksi terutama melalui gaya nuklir dan Coulomb. Sistem ini mungkin tampak begitu rumit sehingga hanya sedikit yang dapat dipelajari tentang struktur terperinci. Memang, banyak dari para peneliti yang terlibat dalam penelitian struktur nuklir menyatakan dengan keras bahwa yang diketahui baru saja menyentuh permukaan luar bukan pemahaman secara mendalam tentang struktur nuklir. Namun dari perspektif lain memiliki sejumlah besar fakta tentang inti atom dan memahami sejumlah besar yang seringkali dengan sangat rinci tentang apa yang dilakukan masing-masing nukleon dalam nukleus.

Hal ini mengarah pada fenomena nuklir yang diamati, bagaimana dan mengapa fenomena ini berubah dari satu nukleus ke nukleus lainnya, dan bagaimana nukleon tertentu berinteraksi satu sama lain dalam medium nuklir. Terdapat model dasar seperti model cangkang dan model kolektif baik yang geometris maupun aljabar yang menyediakan kerangka kerja untuk

penyederhanaan pemahaman yang sangat sederhana. Hanya setelah model dan kerangka kerja ini dipahami, keterbatasan dalam pengetahuan menjadi terfokus dan dapat diidentifikasi. Adapun identifikasi masalah yang masih ada merupakan prasyarat untuk kemajuan lebih lanjut. Struktur nuklir diawali dengan pembahasan tentang gaya nuklir.

### 2.1.1 Gaya Nuklir

Salah satu masalah utama fisika nuklir adalah mencari tahu sifat gaya nuklir. Gaya nuklir berbeda dari semua jenis gaya lain yang diketahui. Gaya nuklir tidak dapat berasal dari listrik karena gaya nuklir bekerja di antara partikel bermuatan dan partikel netral (misalnya, antara neutron dan proton dalam deutron). Gaya nuklir juga tidak dapat bersifat magnetis karena interaksi antara momen magnetik nukleon sangat lemah. Jadi, interaksi nuklir disebabkan oleh gaya nuklir, yang berbeda dari semua jenis gaya yang diketahui dan disebut gaya nuklir. Sebagian besar informasi tentang gaya antar nukleon diperoleh dari studi sistem dua nukleon sederhana seperti deutron. Keadaan dasar deutron dicirikan oleh besaran terukur berikut.

Energi ikat: 2.22 MeV, Spin inti: 1, Paritas genap, momen dipol magnet: +0.857  $\mu_n$ , Momen kuadropol listrik: +2.7 $\times 10^{-31}$  Jari-jari: 2.1 fm.

Gaya nuklir adalah anggota dari gaya-gaya fundamental di alam. Gaya nuklir menjadi komponen interaksi dalam model standard. Sifat dari gaya ini meliputi pertama tidak bergantung pada muatan listrik maupun masa nukleon, kedua berjangkauan pendek dan tolak menolak ketika saling mendekat dan tarik menarik ketika saling menjauh.

Secara mikroskopik dimodelkan oleh yukawa (Yukawa, 1935) melalui model pertukaran meson, selanjutnya menurut standard model interaksi kuat ini terjadi melalui pertukaran warna gluon. Begitu kompleksnya teori tentang interaksi kuat ini, maka gaya nuklir yang dipergunakan pada teori penunjang data nuklir hanyalah interaksi dalam skala non quark.

### 2.1.2 Ukuran Nuklir

Inti atom adalah sistem terikat yang terdiri dari satu hingga sekitar tiga ratus fermion yang berinteraksi kuat dari dua jenis yang berbeda, proton dan neutron. Gaya antara nukleon-nukleon ini terdiri dari gaya nuklir kuat dan

untuk proton tolakan elektrostatis Coulomb. Hal yang menjadi pertimbangan adalah jumlah nukleon terlalu kecil untuk pendekatan statistik, tetapi menjadi lebih dari sekadar perkiraan kasar. Selain itu kekuatan gaya ikat terlalu besar untuk pendekatan perturbatif.

Inti atom adalah sistem yang kompleks dan sulit untuk dipelajari oleh karenanya pemodelan sering digunakan, dalam model tertentu tujuannya adalah untuk menggambarkan sebagian kecil fenomena yang diamati dalam konteks yang disederhanakan dengan menggabungkan sebagian kecil derajat kebebasan yang tersedia. Pemodelan ini juga memiliki interpretasi yang berbeda dalam mekanika kuantum saat menggambarkan sistem.

Dalam konteks nukleus, apa yang dimaksud dengan ukuran bergantung pada bagaimana luas spasial diukur. Hal ini dapat menghasilkan dimensi yang terkait dengan muatan atau distribusi materi di dalam nukleus. Pengukuran distribusi tersebut umumnya menghasilkan parameterisasi sederhana,  $r=r_0A^{1/3}$ , di mana  $A$  adalah jumlah nukleon dan  $r_0$  adalah konstanta. Distribusi materi umumnya diukur dengan probe yang berinteraksi dengan gaya nuklir kuat dalam proses seperti hamburan nuklir, peluruhan, dan sinar-X dari atom pionik. Untuk nukleus yang mendekati stabilitas, ditemukan bahwa perbedaan antara jari-jari materi dan muatan adalah sekitar 0,1 fm. Sepanjang garis stabilitas, nukleus memiliki lebih banyak neutron daripada proton, tetapi tolakan Coulomb antara proton dan tarikan proton-neutron cenderung menarik proton keluar untuk memberikan jari-jari yang sama. Jauh dari stabilitas, di sisi yang kaya neutron, neutron dapat menjadi terikat sangat lemah sehingga mereka bebas di luar inti atom lainnya. Misalnya,  $^{11}\text{Li}$  memiliki luas spasial yang sangat mirip dengan inti atom  $^{208}\text{Pb}$ .

Sedangkan untuk massa inti, di dalam daerah *drip line* merupakan sistem terikat: yaitu  $m_{\text{nukleus}} < N m_{\text{neutron}} + Z m_{\text{proton}}$ . Massa inti atom memiliki kontribusi dari nukleon, dan gaya nuklir dan elektrostatis di dalam sistem.

### 2.1.3 Momentum Sudut dan Paritas

Nukleon adalah fermion dan memiliki spin intrinsik setengah bilangan bulat. Selain itu, mereka bergerak di dalam nukleus relatif terhadap pusat massa dan karenanya dapat menghasilkan momentum sudut orbital. Momentum sudut total nukleon itu sendiri berpasangan untuk memberikan total spin inti secara

keseluruhan, yaitu dengan simbol  $\mathbf{J}$ . Momentum sudut dihasilkan oleh masing-masing komponen inti, yaitu nukleon.

Kadang-kadang berguna untuk membayangkan momentum sudut dihasilkan dalam gambar yang lebih makroskopis. Misalnya, orbit nukleon individu dapat berfluktuasi dan jumlah total sedemikian rupa sehingga menghasilkan distribusi materi non-bulat yang tampak berputar di ruang. Momentum sudut dapat dianggap dihasilkan oleh rotasi bentuk inti yang terdeformasi secara keseluruhan, tetapi pada kenyataannya masih dihasilkan oleh masing-masing nukleon itu sendiri.

Momentum sudut rotasi tidak boleh lebih besar dari yang dihasilkan oleh nukleon itu sendiri. Tanda penjumlahan berarti "digabungkan bersama" semua momentum nukleon individu  $\mathbf{j}$ . Sering kali pita rotasi dapat mengalami gangguan mendadak pada urutan rotasi  $I(I+1)$  yang biasa ketika momentum sudut nukleon individu dalam konfigurasi tertentu habis, yang disebut terminasi pita. Untuk menghasilkan lebih banyak momentum sudut, nukleon harus didistribusikan ulang dalam konfigurasi dengan momentum sudut yang lebih tersedia, misalnya, dengan mengeksitasi satu nukleon ke orbital partikel tunggal dengan  $\mathbf{j}$  yang lebih tinggi. Adapun nilai  $\mathbf{J}$  ini sekaligus memberikan nilai paritas dari sebuah nukleus.

#### **2.1.4 Sifat Elektromagnetik**

Kedua nukleon memiliki momen magnetik tersendiri dan bergerak di dalam nukleus selain itu proton juga membawa muatan. Oleh karena itu, nukleus memiliki distribusi internal muatan dan arus di mana dapat diharapkan dicirikan oleh momen elektromagnetik E-M. Momen E-M Ini dapat berinteraksi dengan medan luar dan dengan vakum yaitu elektromagnetik dalam peluruhan gamma  $\gamma$ . Medan listrik atau medan magnet yang berkaitan dengan muatan atau distribusi arus sembarang dapat digambarkan sebagai jumlah dari serangkaian multipol yang masing-masing memiliki ketergantungan spasial yang khas.

Untuk medan magnet, monopole magnet tidak ada atau sangat jarang, jadi suku pertama dalam deret menjadi tidak ada. Untuk distribusi sederhana, deret multipol tersebut berakhir tiba-tiba. Misalnya, bola muatan hanya memiliki suku monopole listrik dan loop arus melingkar murni yang merupakan suku dipole magnet. Distorsi kecil dari bentuk bola menghasilkan

multipole orde tinggi. Bukti pertama untuk hal ini adalah bentuk inti tak berbentuk bola sebagai akibat dari pengamatan momen kuadrupol listrik yang sangat besar.

Penataan ulang struktur internal inti akan menghasilkan keadaan gerak dengan energi lebih besar daripada energi minimum yang dapat ditampung sistem. Keadaan tereksitasi ini dicirikan oleh energi eksitasi dan nilai paritas spin, serta bilangan kuantum lainnya. Penataan ulang ini dapat dengan mudah divisualisasikan sebagai perubahan dalam gerakan nukleon individual, tetapi juga dapat dilihat sebagai perubahan dalam gerakan massal inti seperti rotasi dan getaran permukaan. Untuk mengetahui lebih dalam tentang struktur maka harus mengenal proses dinamik di dalam nukleus. Untuk itulah diperlukan pemodelan inti.

### **2.1.5 Model Inti**

Untuk mengetahui apa sebenarnya dinamika yang terjadi di dalam nukleus maka diperlukan model. Model ini merepresentasi bentuk sederhana dari kompleksitas sistem. Terdapat beberapa model yang dikenal, dimulai dari model mikroskopis (Rowe, 1985) hingga model makroskopis (Sierk, 1986).

Tujuan dari model nuklir adalah untuk memahami bagaimana kombinasi tertentu dari  $N$  neutron dan  $Z$  proton membentuk keadaan terikat dan untuk memahami massa, spin, dan paritas dari keadaan tersebut. Sebagian besar nukleus mengandung kelebihan neutron atau proton dan karenanya tidak stabil terhadap  $\beta$ . Inti berat yang memiliki banyak nukleon meluruh melalui emisi partikel  $\alpha$  atau melalui bentuk fisi spontan lainnya menjadi unsur-unsur yang lebih ringan. Masalah penghitungan energi, spin, dan paritas inti merupakan salah satu masalah tersulit dalam fisika teoretis.

#### **2.1.5.1 Model Tetes Cairan**

Model tetes cairan inti atom, yang diusulkan oleh Bohr dan diturunkan oleh Von Weizsacker pada tahun 1935 (Weizsäcker, 1935), merupakan salah satu keberhasilan fenomenologis paling awal yang dibangun untuk memperhitungkan energi ikat nukleus. Eksperimen mengungkapkan bahwa nukleus pada dasarnya adalah objek berbentuk bola, dengan ukuran yang dapat dicirikan oleh jari-jari yang sebanding dengan  $A^{1/3}$ , yang menunjukkan bahwa kerapatan inti atom hampir tidak bergantung pada jumlah nukleon.

Hal ini secara alami mengarah pada model yang membayangkan inti atom sebagai tetesan cairan yang tidak dapat dimampatkan, dengan nukleon memainkan peran yang analog dengan molekul dalam setetes cairan normal.

Dalam gambaran ini, yang dikenal sebagai model tetes cairan, sifat kuantum nukleon secara individual diabaikan sepenuhnya. Seperti dalam kasus tetes cairan, nukleus dibayangkan tersusun dari inti pusat nukleon yang stabil yang gaya nuklirnya sepenuhnya jenuh (berdasarkan rentang pendek gaya nuklir), dan lapisan permukaan nukleon yang tidak terikat dengan kuat (gaya tidak jenuh). Ikatan yang lebih lemah di permukaan ini menurunkan energi ikat efektif per nukleon ( $B/A$ ), dan memberikan "tegangan permukaan", atau tarikan nukleon permukaan ke arah pusat. Nukleon berinteraksi kuat dengan tetangga terdekatnya, seperti halnya molekul dalam setetes air. Oleh karena itu, dapat dilakukan penggambaran sifat-sifatnya dengan kuantitas yang sesuai, yaitu jari-jari, kepadatan, tegangan permukaan, dan energi volume

Asumsi penting dari model ini adalah: Inti atom terdiri dari materi yang tidak dapat dikompresi sehingga  $R \sim A^{1/3}$ ; Gaya nuklir identik untuk setiap nukleon dan khususnya tidak bergantung pada apakah itu neutron atau proton; Gaya nuklir berada dalam keadaan jenuh. Melalui model ini massa nukleus berhasil ditentukan secara semi empiris.

Parameterisasi yang sangat baik dari energi ikat nukleus dalam keadaan dasar diusulkan pada tahun 1935 oleh Bethe dan Weizsacker. Rumus ini bergantung pada analogi tetesan cairan tetapi juga menggabungkan dua unsur kuantum; yang pertama adalah energi asimetri yang cenderung mendukung jumlah proton dan neutron yang sama. Yang kedua adalah energi berpasangan yang mendukung konfigurasi di mana dua fermion identik dipasangkan. Adapun koefisien-koefisien yang diaproksimasi secara semi empirik adalah: suku volume, suku permukaan, suku coulomb, suku asimetri, suku pasangan, dan suku kulit (Gamow, 1930).

Istilah pertama adalah istilah volume (Suku volume), yang menjelaskan bagaimana energi ikat sebagian besar sebanding dengan  $A$ , yaitu volume inti atom. Mengingat energi ikat adalah ukuran interaksi antarnukleon. Dikarenakan nukleon tersusun rapat dalam inti atom dan gaya nuklir memiliki jangkauan yang sangat pendek, setiap nukleon akhirnya berinteraksi hanya dengan beberapa tetangga. Ini berarti bahwa terlepas dari

jumlah total nukleon, masing-masing nukleon berkontribusi dengan cara yang sama. Jadi, gaya tidak sebanding dengan jumlah total nukleon yang dapat berinteraksi dengan satu nukleon, tetapi hanya proporsional dengan  $A$ . Konstanta proporsionalitas yang ditemukan secara eksperimental untuk suku ini adalah  $a_v = 15,5\text{MeV}$ . Nilai ini lebih kecil daripada energi ikat nukleon ke tetangganya sebagaimana ditentukan oleh kekuatan interaksi nuklir (interaksi kuat). Sebaliknya, energi ikat total adalah selisih antara interaksi nukleon ke tetangganya dan energi kinetik nukleon itu sendiri. Mengenai elektron dalam atom, nukleon adalah fermion, sehingga semuanya tidak dapat berada dalam keadaan yang sama dengan energi kinetik nol, tetapi mereka akan mengisi semua tingkat energi kinetik menurut prinsip larangan Pauli.

Istilah suku permukaan yang didasarkan pada gaya kuat merupakan koreksi terhadap istilah volume. Istilah volume yang muncul berangkat dari fakta bahwa setiap nukleon berinteraksi dengan sejumlah nukleon yang konstan, terlepas dari  $A$ . Meskipun ini berlaku untuk nukleon yang jauh di dalam nukleus, nukleon-nukleon di permukaan nukleus memiliki lebih sedikit tetangga terdekat. Istilah ini mirip dengan gaya permukaan yang muncul misalnya pada tetesan cairan, suatu mekanisme yang menciptakan tegangan permukaan dalam cairan. Dapat dikatakan bahwa setiap kali luas permukaan inti meningkat, energi ikat akan berkurang. Istilah tersebut juga harus dikurangi dari istilah volume sehingga koefisien  $a_s$  memiliki orde besaran yang sama dengan  $a_v$ , yaitu  $a_s = 16,8\text{MeV}$ .

Suku ketiga berasal dari interaksi Coulomb di antara proton, dan tentu saja sebanding dengan  $Z$ . Suku ini dikurangkan dari suku volume karena tolakan Coulomb membuat inti yang mengandung banyak proton menjadi kurang menguntungkan. Untuk menemukan bentuk suku dan memperkirakan koefisien  $a_c$ , inti dimodelkan sebagai bola bermuatan seragam. Konstanta  $a_c$  dapat diperkirakan sebesar  $a_c = 0,72\text{ MeV}$  di mana nilai ini sesuai dengan nilai eksperimen.

Untuk koreksi asimetri diawali dengan istilah Coulomb yang tampaknya mengindikasikan bahwa akan lebih baik jika jumlah proton dalam nukleus lebih sedikit dan neutron lebih banyak agar energi ikatnya besar. Namun, hal ini tidak berlaku pada model tetesan cairan karena faktanya bahwa nukleus stabil akan memiliki jumlah neutron dan proton yang hampir sama. Ada istilah koreksi dalam SEMF yang mencoba memperhitungkan simetri proton

dan neutron, yaitu kesetaraan di antara keduanya. Koreksi ini (dan yang berikutnya) hanya dapat dijelaskan oleh model nukleus yang lebih kompleks, model cangkang, bersama dengan prinsip eksklusif dalam mekanika kuantum. Jika menambahkan lebih banyak neutron, neutron tersebut harus lebih berenergi, sehingga meningkatkan energi total nukleus. Peningkatan ini lebih besar dari pada tolakan Coulomb, sehingga lebih baik jika memiliki jumlah proton dan neutron yang kira-kira sama. Hal ini dapat lebih mudah dipahami dengan mempertimbangkan fakta bahwa suku ini bernilai nol untuk  $A = 2Z$  dan efeknya lebih kecil untuk  $A$  yang lebih besar (sementara untuk nukleus yang lebih kecil maka efek simetri menjadi lebih penting). Yaitu untuk isobar  $Z=N=A/2$  (simetri) lebih stabil daripada isobar  $Z \neq N$  (Antisimetri atau Asimetri) yang dapat mengurangi energi ikat. Asimetri didefinisikan sebagai perbedaan antara energi ikat untuk dua isobar, satu memiliki  $Z=N$  dan yang lainnya  $Z \neq N$

Suku koreksi pasangan dikaitkan dengan bukti fisik bahwa nukleon sejenis cenderung berpasangan. Ini berarti bahwa energi ikat lebih besar ( $\delta > 0$ ) jika terdapat inti genap-genap, di mana semua neutron dan semua proton berpasangan. Sedangkan jika memiliki inti dengan jumlah neutron dan proton ganjil, maka lebih baik untuk mengubah salah satu proton menjadi neutron atau sebaliknya. Jadi, dengan semua faktor lainnya konstan, maka haruslah mengurangi ( $\delta < 0$ ) energi ikat pada kondisi konfigurasi ganjil-ganjil. Akhirnya, untuk konfigurasi ganjil-genap tidak mengharapkan pengaruh apa pun dari energi pasangan ini ( $\delta = 0$ ). Dengan kata lain inti genap-genap menambah energi ikat, inti ganjil-ganjil mengurangi energi ikat, dan inti ganjil-genap tidak menambah atau mengurangi apapun terhadap energi ikat.

Koreksi kulit (Cameron, 1957) muncul akibat ditemukannya secara eksperimen bahwa untuk nukleus dengan kondisi  $N=Z$  dan yang mempunyai bilangan ajaib ganda (2,8,20,28,50,82,...) memiliki kestabilan yang tinggi serta energi ikat nukleus yang memiliki kelimpahan tinggi.

### **2.1.5.2 Model Kulit atau Model Cangkang**

Model partikel tunggal yang paling sederhana adalah model cangkang nuklir (Feenberg, 1949). Model ini didasarkan pada pengamatan bahwa rumus massa nuklir, yang menggambarkan massa nuklir dengan cukup baik secara rata-rata, gagal untuk "angka ajaib" tertentu, yaitu, untuk jumlah neutron  $N=2,8,20,28,50,82,126$  dan jumlah proton  $Z=2,8,20,28,50,82$ . Inti-inti ini terikat jauh

lebih kuat daripada yang diprediksi rumus massa, terutama untuk kasus-kasus ajaib ganda, yaitu, ketika  $N$  dan  $Z$  keduanya ajaib. Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa hal ini disebabkan oleh struktur cangkang, seperti yang telah terlihat untuk elektron dalam fisika atom.

Pada atom, gaya Coulomb dari inti beratlah yang memaksa elektron untuk menempati orbital tertentu. Hal ini dapat dilihat sebagai pengaruh eksternal. Pada inti, tidak ada gaya eksternal seperti itu, jadi harus menemukan mekanisme yang berbeda.

Solusinya, dan alasan mengapa gagasan struktur cangkang dalam nukleus merupakan gagasan yang sangat berlawanan dengan intuisi, hal ini dikarenakan seharusnya interaksi yang terjadi antar nukleon secara keseluruhan, nukleon tidak berinteraksi hanya dengan satu potensial. Akibatnya efek ini diganti dengan potensial rata-rata.

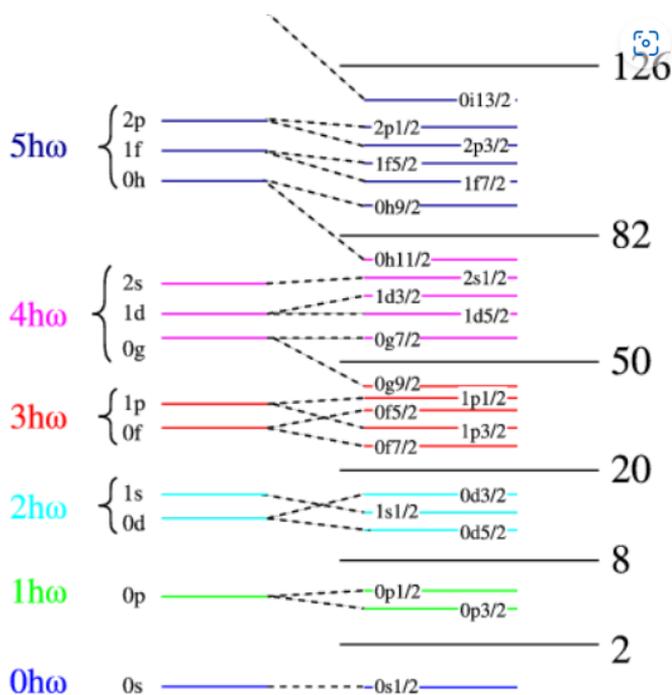
Bukti adanya struktur kulit dan jumlah terbatas dari keadaan energi yang diizinkan menunjukkan bahwa sebuah nukleon bergerak dalam semacam sumur potensial efektif atau potensial rata-rata yang diciptakan oleh gaya dari semua nukleon lainnya. Hal ini mengarah pada kuantisasi energi dengan cara yang mirip dengan sumur kuadrat dan potensial osilator harmonik. Karena detail sumur menentukan energi, banyak upaya telah dilakukan untuk membangun sumur potensial untuk pemodelan tingkat energi nuklir yang diamati. Memecahkan energi dari potensi tersebut menghasilkan serangkaian tingkat energi seperti yang ada di sebelah kiri bawah. Label pada tingkat tersebut agak berbeda dari simbol yang sesuai untuk tingkat energi atom. Tingkat energi meningkat dengan bilangan kuantum momentum sudut orbital  $l$ , dan simbol s,p,d,f... digunakan untuk  $l=0,1,2,3...$  seperti kasus atom. Namun, sebenarnya tidak ada analog fisik untuk bilangan kuantum utama  $n$ , jadi angka yang terkait dengan tingkat tersebut hanya dimulai pada  $n=1$  untuk tingkat terendah yang terkait dengan bilangan kuantum orbital tertentu, yang menghasilkan simbol seperti  $1g$  yang tidak dapat muncul dalam skema pelabelan atom. Nomor kuantum untuk momentum sudut orbital tidak terbatas pada  $n$  seperti dalam kasus atom.

Selain ketergantungan pada detail sumur potensial dan nomor kuantum orbital, terdapat interaksi spin-orbit yang cukup besar yang membagi level dengan jumlah yang meningkat seiring dengan nomor kuantum orbital. Hal ini menyebabkan level yang tumpang tindih. Kontribusi proton terhadap

energi agak berbeda dari neutron karena tolakan coulomb, tetapi tidak banyak berpengaruh pada kumpulan level energinya.

Dengan set keadaan nuklir yang teridentifikasi dan angka ajaib ini, maka dapat memprediksi total spin nuklir dari sebuah nukleus dan merepresentasikan keadaan nuklirnya berdasarkan identifikasi level nukleon ganjil dalam urutan keadaan yang ditunjukkan. Paritas juga dapat diprediksi, sehingga model kulit partikel tunggal telah menunjukkan manfaat yang signifikan dalam mengkarakterisasi nukleus.

Berikut ini sebuah ilustrasi tingkat-tingkat energi sebuah nukleon dalam nukleus akibat adanya potensial efektif berbentuk osilator harmonik



**Gambar 17** Representasi skematis struktur cangkang dalam nukleus akibat potensial efektif harmonik

Diagram atau skema tingkat-tingkat energi ini sangat bermanfaat ketika mempelajari atau memodelkan radiasi sinar gamma.

### 2.1.6 Model Kolektif

Selain nukleon-nukleon individual yang mengubah orbit untuk menciptakan keadaan tereksitasi dari inti atom sebagaimana dijelaskan oleh Model Shell,

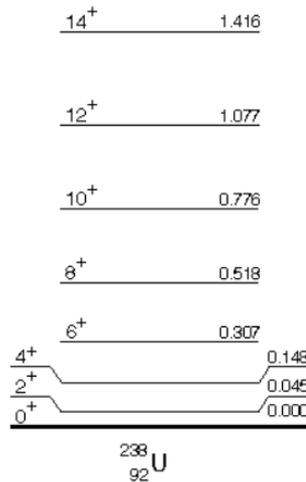
terdapat transisi nuklir yang melibatkan banyak (jika tidak semua) nukleon. Dikarenakan nukleon-nukleon ini bekerja bersama-sama, sifat-sifatnya disebut kolektif, dan transisinya dijelaskan oleh Model Kolektif struktur nuklir (Peierls, 1957). Nukleus dengan nomor massa besar memiliki keadaan tereksitasi rendah yang dijelaskan sebagai getaran atau rotasi inti atom yang tidak berbentuk bola. Banyak dari sifat kolektif ini mirip dengan sifat-sifat tetesan cairan yang berputar atau bergetar, dan dalam perkembangan awalnya Model Kolektif disebut Model Tetesan Cairan. Sebagaimana yang telah dijelaskan bahwa aplikasi penting pertama dari model tetesan cairan adalah dalam analisis fisi nuklir, di mana inti atom yang masif terbelah menjadi dua fragmen bermassa lebih rendah. Model tetesan cairan menghitung penghalang energi terhadap fisi sebagai jumlah gaya tolak Coulomb antara proton-proton inti atom dan tegangan permukaan yang menarik dari kulit inti atom "tetesan cairan".

Ketika membayangkan sebuah nukleus sebagai cairan, akan muncul pertanyaan tentang bentuk kesetimbangannya. Dari data eksperimen telah diketahui bahwa nukleus yang berada di dekat cangkang tertutup berbentuk bulat, yaitu bentuk kesetimbangannya adalah bulat. Ketika jumlah proton dan neutron berbeda jauh dari angka ajaib, keadaan dasar sering ditemukan mengalami deformasi aksial, baik prolata (seperti cerutu) atau oblate (seperti panekuk).

Analisis yang berguna untuk dilakukan adalah melihat apa yang terjadi ketika kita sedikit mendeformasi nukleus, mengubahnya menjadi elipsoid, dengan satu sumbu sedikit lebih panjang dari yang lain, dengan menjaga volume tetap konstan dan luas permukaannya meningkat karena perpanjangan dan kontraksi. Jadi energi permukaan meningkat dengan faktor yang sama. Namun, ada satu istilah yang bersaing, karena energi Coulomb juga berubah, energi Coulomb turun, karena partikelnya semakin jauh. Jika potensial penghalang yang terbentuk cukup rendah, nukleus dapat mengalami fisi secara spontan. Untuk penghalang yang lebih tinggi, dibutuhkan reaksi nuklir untuk memicu fisi.

Gambar 18 menunjukkan tingkat energi  $^{238}\text{U}$ . Bilangan kuantum, jarak antara level, dan probabilitas transisi sinar gamma mengidentifikasi level ini sebagai keadaan rotasi inti nonsferis. Inti yang menunjukkan sifat kolektif biasanya adalah inti dengan banyak nukleon valensi, yaitu inti dengan jumlah

proton atau neutron yang jauh dari kulit yang terisi. Seperti halnya Model Kulit, Model Kolektif memungkinkan perhitungan spin-paritas dan probabilitas transisi yang sesuai dengan sifat terukur inti kolektif.

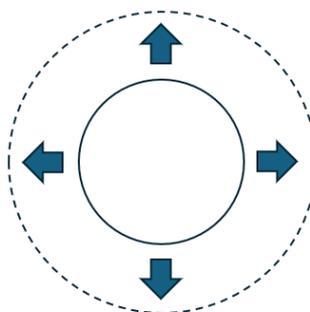


**Gambar 18** Representasi skematis tingkatan energi dalam nukleus dari model kolektif.

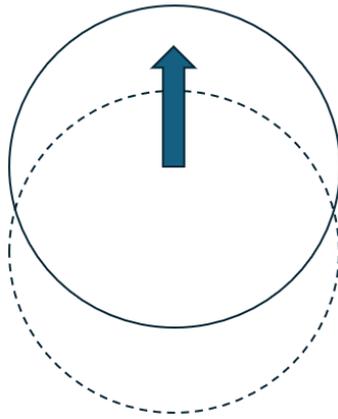
Karena diketahui bahwa fluida inti hampir dapat dimampatkan, maka eksitasi dinamisnya adalah eksitasi yang menyebabkan bentuk inti berfluktuasi, dengan volume tetap, dan eksitasi yang menyebabkan inti berotasi tanpa mengubah bentuk intrinsiknya.

Model kolektif terbagi menjadi beberapa model yaitu: model vibrasional, model rotasional, model vibrasional, dan rotasional.

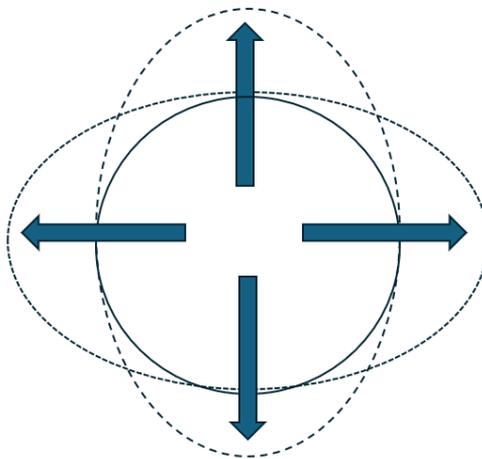
Pada mode vibrasional nukleus mengalami deformasi perubahan bentuk atau deformasi ini meliputi monopol, dipol, kuadrupol, dan oktopol.



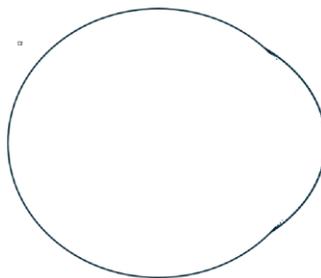
**(a)** Vibrasi monopol



**(b)** Vibrasi dipol



**(c)** Vibrasi kuadropol



**(d)** Vibrasi oktopol

**Gambar 19** Mode vibrasi nucleus

Gambar 19 adalah ilustrasi dari peristiwa gerak vibrasi nukleus (Weaver, 1976). Gambar 19a menunjukkan vibrasi monopole, sering dikenal juga dengan gerak bernafas dikarenakan gerakannya membesar dan mengecil seperti gerakan paru-paru pada tubuh manusia. Pada gambar 19b, ukuran inti tidak mengalami perubahan akan tetapi mengalami getaran, seperti sebuah bola yang digetarkan ke kiri dan ke kanan, berbeda dengan gerakan dari mode vibrasi kuadrupole, nukleus mengalami perubahan ukuran dan bentuk.

## 2.2 Reaksi Nuklir

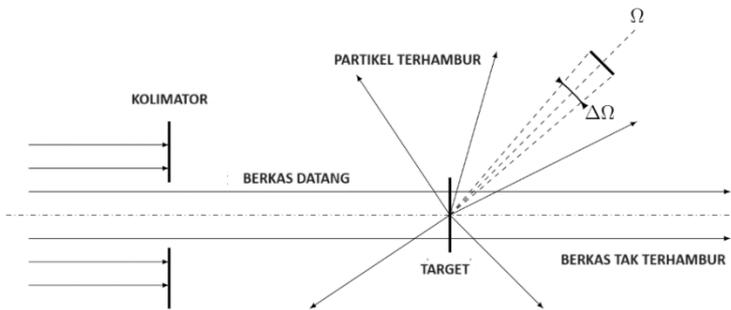
Reaksi nuklir digunakan untuk berbagai tujuan. Reaksi nuklir dapat digunakan untuk mempelajari struktur inti atom; terkadang, reaksi nuklir dapat menjadi satu-satunya cara untuk menyelidiki struktur inti atom, terutama yang jauh dari stabilitas. Reaksi nuklir juga memberikan informasi tentang interaksi antara inti atom, baik untuk mempelajari dasar-dasar gaya nuklir, atau untuk mengukur laju reaksi, yang merupakan masukan utama dalam bidang fisika lainnya, seperti astrofisika nuklir, atau dalam berbagai aplikasi nuklir, seperti tenaga nuklir atau produksi isotop radioaktif untuk keperluan medis. Untuk menganalisis dan memanfaatkan data pengukuran reaksi dengan benar, penting untuk mengetahui dasar-dasar teori reaksi nuklir.

Tumbukan kuantum digunakan dalam berbagai aplikasi. Terkadang tumbukan kuantum merupakan satu-satunya cara untuk mempelajari interaksi antarpartikel. Misalnya, potensial yang digunakan dalam kalkulasi struktur nuklir untuk mensimulasikan interaksi antarnukleon sebagian besar disimpulkan dari pengamatan yang diukur dalam tumbukan antarnukleon. Tumbukan juga digunakan untuk menyimpulkan informasi tentang struktur objek kuantum.

Eksperimen terkenal Rutherford, Geiger, dan Marsden (Geiger, 1909) yang dilakukan pada tahun 1909 adalah contoh yang baik. Eksperimen ini, di mana partikel alfa ditembakkan ke lapisan emas, memungkinkan penemuan struktur atom. Saat ini, reaksi diukur untuk mempelajari struktur inti di seluruh bagan nuklir. Dengan cara yang lebih alami, tumbukan juga dapat digunakan untuk memperoleh laju reaksi yang menarik, misalnya, untuk reaksi yang terjadi di bintang atau yang diperlukan dalam aplikasi teknologi,

seperti reaktor nuklir atau untuk menghasilkan isotop radioaktif untuk penggunaan medis.

Skema pengukuran reaksi-reaksi ini dalam fisika nuklir secara umum diilustrasikan secara skematis dalam gambar di bawah ini. Sinar datang yang terdiri dari partikel-partikel proyektil, yang datang dari kiri, pertama-tama dikolimasi sebelum mengenai target tetap. Partikel-partikel yang dihasilkan selama tumbukan kemudian dihamburkan ke semua arah yang memungkinkan ( $\Omega$ : Sudut ruang) dan diukur dalam detektor-detektor yang mengelilingi target. Detektor-detektor ini memiliki ukuran yang terbatas dan terlihat dari target di bawah sudut ruang  $\Delta \Omega$ . Perhatikan bahwa sejumlah besar partikel yang datang tidak akan bereaksi dan terus bergerak lurus ke depan, tidak dibelokkan oleh target. Dikarenakan sinar yang tidak dihamburkan ini mengukur reaksi pada sudut hamburan yang sangat kecil bisa jadi cukup sulit, jika bukan tidak mungkin.



**Gambar 20** Skema eksperimen reaksi nuklir

Meskipun reaksi yang terjadi selama tumbukan dapat secara signifikan memengaruhi struktur partikel yang bertumbukan, beberapa nilai fisika bersifat kekal. Salah satu kasus khusus adalah energi total sistem, yang tetap sama sebelum dan sesudah tumbukan. Kekekalannya berarti bahwa jumlah energi massa dan energi kinetik total dalam setiap saluran keluar harus sama dengan yang ada di saluran masuk.

Pada setiap reaksi nuklir ada sebuah nilai yang melambangkan aliran energi pada reaksi tersebut. Besaran tersebut dikenal dengan nilai-Q. Jika  $Q > 0$ , reaksi tersebut dikatakan eksoenergetik karena menghasilkan energi. Secara energetik, reaksi tersebut selalu memungkinkan. Sebaliknya, jika  $Q < 0$ , reaksi tersebut dikatakan endoenergetik dan memerlukan energi kinetik awal minimal untuk berlangsung. Pada sudut pandang energi tunggal, suatu

saluran akan dikatakan terbuka jika  $T_{in}$  (kinetik datang)  $> -Q$ . Jika tidak demikian, yaitu jika reaksinya endoenergetik dan jika energi kinetik insiden lebih rendah dari  $|Q|$ , saluran tersebut dikatakan tertutup. Perhatikan bahwa saluran hamburan elastis selalu terbuka, karena dalam kasus tersebut  $Q = 0$ .

Untuk mengarakterisasi reaksi dan mengukur probabilitasnya untuk terjadi selama tumbukan dua partikel, digunakan konsep penampang lintang. Untuk memperkenalkan pengamatan ini, dapat dibantu melalui gambar tadi di atas. Jumlah partikel yang terdeteksi dalam arah  $\Omega$  per satuan waktu dalam sudut ruang  $\Delta \Omega$  yang dicakup oleh detektor secara alami akan sebanding dengan fluks partikel yang masuk dan jumlah  $N$  partikel dalam target. Dengan kata lain penampang lintang dapat dikatakan setara dengan nilai kemungkinan terjadinya suatu reaksi, semakin tinggi nilai penampang lintang maka semakin besar kemungkinan reaksi itu terjadi. Satuan dari penampang lintang adalah barn. Satu barn setara dengan luas lingkaran berdiameter  $8 \times 10^{-15}$  meter.

### 2.2.1 Hamburan Elastik

Ketika seberkas partikel, yang direpresentasikan dalam mekanika kuantum sebagai gelombang bidang, menghantam sebuah inti, fungsi gelombang dimodifikasi oleh keberadaan potensi hamburan  $V$ , yang bertanggung jawab atas munculnya fase di bagian gelombang yang keluar. Hamburan elastis hanyalah salah satu saluran tempat reaksi dapat berlangsung dan dikenal sebagai saluran elastis. Hamburan inelastis dan semua saluran lainnya dikelompokkan dalam saluran reaksi. Terjadinya reaksi nuklir melalui saluran reaksi tertentu menyebabkan modifikasi bagian gelombang yang keluar tidak hanya oleh faktor fase, tetapi juga dengan mengubah besarnya, yang menunjukkan bahwa ada kehilangan partikel di saluran elastis.



Gambar 21 Diagram ilustrasi reaksi nuklir

Saluran masuk adalah saluran yang dilewati oleh konfigurasi nuklida atau partikel sebelum reaksi berlangsung. Sedangkan saluran keluar adalah

saluran yang dilewati oleh hasil reaksi, saluran keluar ini terbagi menjadi dua bagian, yaitu saluran reaksi nuklir dan saluran hamburan elastik.

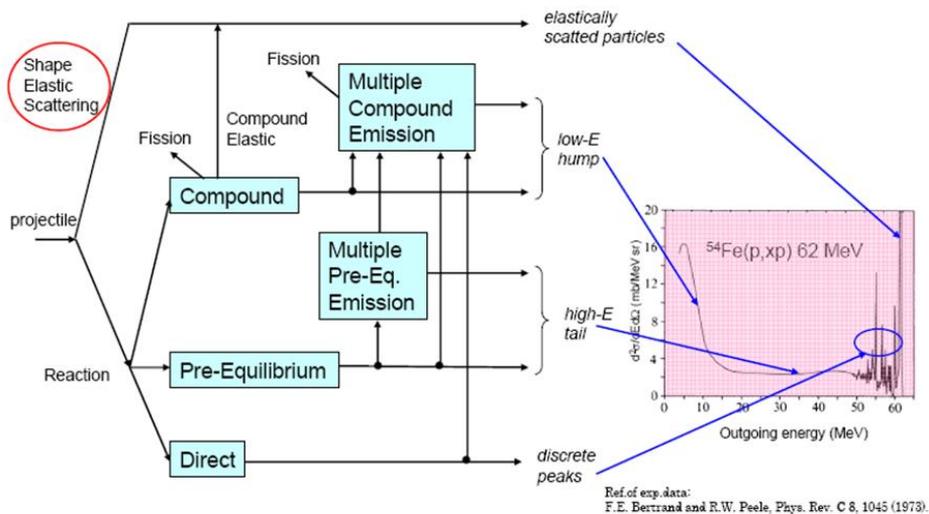
Pada gambar tersebut terdapat kotak hitam, sesuai dengan namanya kotak hitam ini melambangkan peristiwa yang mungkin terjadi dan tidak diketahui.

Dalam hamburan elastis, keadaan mitra tumbukan dan total energi kinetik kekal selama interaksi. Untuk hamburan biner, interaksi dicirikan oleh gaya konservatif yang hilang dalam batas jarak tak terhingga antara mitra tumbukan.

### 2.2.2 Hamburan Non-elastik

Hamburan non-elastik adalah hamburan di mana saluran masuk dengan saluran keluar mengalami perubahan baik energi maupun bilangan kuantumnya. Semua reaksi yang tidak elastik digolongkan sebagai hamburan non elastik. Untuk menghitung penampang reaksi, perlu dihitung jumlah partikel yang hilang dari saluran elastis, yang diukur dengan fluks arus vektor probabilitas melalui permukaan bola dengan radius besar yang berpusat di target.

Begitu tersebaranya hamburan non-elastik ini diperlukan ilustrasi diagramatik untuk menggambarannya.



Gambar 22 Diagram ilustrasi reaksi nuklir secara lengkap

Ketika proyektil menumbuk target, yang terjadi adalah hamburan elastik atau reaksi. Untuk hamburan elastik terdapat tiga kemungkinan untuk terjadi yaitu reaksi inti majemuk, reaksi pre-equilibrium, dan reaksi langsung. Reaksi langsung dan reaksi inti majemuk dibedakan dari interval waktu reaksinya. Reaksi langsung waktu reaksi sangat singkat, yaitu  $10^{-20}$  detik, sedangkan reaksi inti majemuk waktu yang diperlukan  $10^{-16}$  detik. Untuk pre-equilibrium adalah reaksi dalam keadaan sebelum setimbang berada di antara reaksi langsung dan reaksi inti majemuk.

Meskipun waktunya singkat, reaksi langsung bisa saja berlanjut ke reaksi emisi multipel. Kedua kondisi akhir dari reaksi langsung ini memiliki penampang lintang yang berbeda.

### **2.2.2.1 Pre-Equilibrium**

Telah diketahui bahwa pemisahan mekanisme reaksi nuklir menjadi reaksi langsung dan reaksi inti majemuk terlalu sederhana. Seperti yang ditunjukkan penampang melintang seperti yang diprediksi oleh proses reaksi gabungan murni terlalu kecil sehubungan dengan spektrum kontinum yang terukur, dan proses langsung yang dijelaskan di bagian sebelumnya hanya membangkitkan level diskret pada energi keluar tertinggi.

Lebih jauh, distribusi sudut terukur di wilayah antara reaksi langsung dan reaksi gabungan bersifat anisotropik, yang menunjukkan keberadaan proses reaksi langsung yang menyimpan memori. Sebagai perantara antara dua ekstrem tersebut, terdapat jenis reaksi yang mewujudkan fitur langsung dan reaksi majemuk. Reaksi-reaksi ini disebut sebagai pre-equilibrium, pre-majemuk atau, ketika dibahas dalam konteks mekanika kuantum, proses multi-langkah. Emisi pre-equilibrium terjadi setelah tahap pertama reaksi tetapi jauh sebelum keseimbangan statistik inti reaksi majemuk tercapai. Dibayangkan bahwa partikel datang selangkah demi selangkah menciptakan keadaan yang lebih kompleks dalam sistem majemuk dan secara bertahap kehilangan memorinya tentang energi dan arah awal. Proses pre-equilibrium mencakup bagian yang cukup besar dari penampang reaksi untuk energi insiden antara 10 dan (setidaknya) 200 MeV. Reaksi pre-equilibrium telah dimodelkan baik secara klasik maupun mekanika kuantum.

Pre-equilibrium dapat dimodelkan menggunakan model eksiton (ignatjuk, 1992), yaitu model partikel-lubang. Partikel adalah nukleon sementara lubang adalah tempat yang ditinggalkan oleh nukleon ketika eksitasi.

Untuk dapat melacak evolusi proses hamburan cukup dengan melacak perkembangan temporal jumlah eksiton, yang berubah seiring waktu sebagai akibat dari tumbukan dua benda intranuklir. Titik awal dasar model eksiton adalah persamaan induk yang bergantung pada waktu, yang menggambarkan probabilitas transisi ke keadaan lubang partikel yang lebih dan kurang kompleks serta transisi ke kontinum (emisi). Setelah diintegrasikan dari waktu ke waktu, spektrum emisi energi rata-rata diperoleh. Asumsi-asumsi ini membuat model eksiton sesuai untuk perhitungan praktis. Namun, harga yang harus dibayar adalah pengenalan parameter bebas, yaitu elemen matriks rata-rata dari interaksi dua benda residual, yang terjadi dalam laju transisi antara dua keadaan eksiton. Ketika elemen matriks ini diparameterisasi dengan benar, model yang sangat kuat diperoleh.

Secara kualitatif, proses penyeimbangan inti yang tereksitasi dibayangkan berlangsung sebagai berikut, setelah memasuki inti target, partikel datang bertabrakan dengan salah satu nukleon dari laut Fermi, dengan kedalaman  $E_F$ . Dalam kasus reaksi yang diinduksi nukleon, yang pertama adalah mengalami emisi partikel, yang mengonfirmasi gambaran model eksiton sebagai model seperti senyawa daripada model seperti reaksi langsung. Interaksi selanjutnya menghasilkan perubahan jumlah eksiton. Selain transisi ke keadaan eksiton yang lebih kompleks atau kurang kompleks, pada tahap apa pun tidak ada kemungkinan bahwa sebuah partikel dipancarkan. Jika ini terjadi pada tahap awal, secara intuitif jelas bahwa partikel yang dipancarkan mempertahankan beberapa ingatan tentang energi dan arah kejadian sebelum masuk ke inti target, sehingga hipotesis inti majemuk yang sepenuhnya seimbang tidak valid.

Fase ini disebut fase pre-equilibrium, dan bertanggung jawab atas ekor energi tinggi yang diamati secara eksperimental dan distribusi sudut berpuncak ke depan. Jika emisi tidak terjadi pada tahap awal, sistem akhirnya mencapai keseimbangan (kuasi). Situasi keseimbangan, yang sesuai dengan angka eksiton yang tinggi, terbentuk setelah sejumlah besar interaksi, yaitu setelah selang waktu yang lama, dan sistem telah "melupakan" keadaan awal. Dengan demikian, tahap ini dapat disebut tahap majemuk atau penguapan.

Oleh karena itu, pada prinsipnya model eksiton memungkinkan untuk menghitung penampang emisi secara terpadu, tanpa memperkenalkan penyesuaian antara kontribusi equilibrium dan pre-equilibrium. Namun, dalam kasus praktis ternyata lebih sederhana dan bahkan lebih akurat untuk membedakan antara kedua fase tersebut dan melakukan yang terakhir dengan formalisme Hauser-Feshbach.

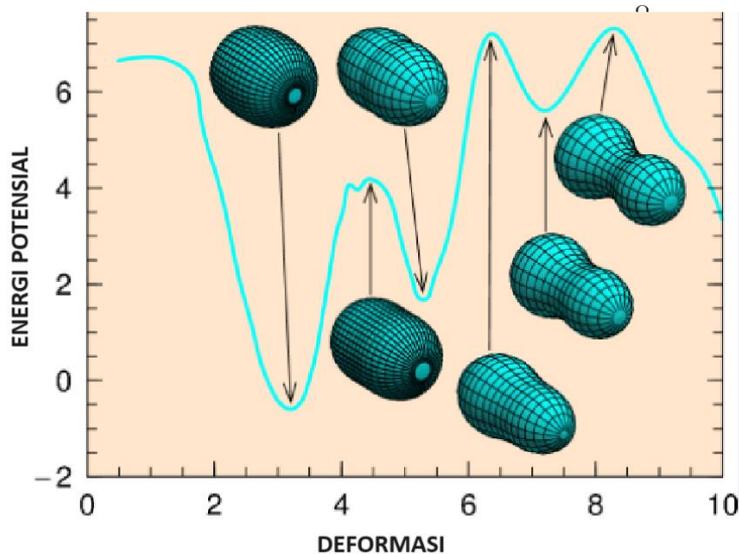
Model eksiton menjadi model yang cukup representatif sebagai model antara yang dapat menengahi inti majemuk dan reaksi langsung.

### **2.2.2.2 Inti Majemuk**

Reaksi yang cukup lama terjadi pada terbentuknya inti majemuk ketika proyektil memasuki inti target. Setelah mencapai waktu yang cukup maka inti majemuk tersebut akan mengalami tiga kemungkinan; pertama terjadinya reaksi fisi, kedua terjadinya peristiwa hamburan elastik, dan yang terakhir terjadinya multipel emisi yang disertai dengan peristiwa fisi. Untuk multipel emisi bisa berupa nukleon atau radiasi alpha, beta, dan gamma.

Reaksi langsung terjadi jika energi proyektil yang datang cukup tinggi, dengan energi tinggi ini proyektil tidak sempat mengendap di inti target, berbeda dengan reaksi inti majemuk. Reaksi majemuk terjadi akibat proyektil dengan energi yang rendah, yaitu sekitar keV masuk kedalam inti target. Rendahnya energi ini berakibat proyektil berdiam cukup lama di dalam inti target dan hilang sejarah asal-usulnya. Masuknya proyektil menyebabkan terjadinya proses dinamika nukleon di dalam inti majemuk tersebut.

Peristiwa dinamika ini berakhir menjadi peristiwa fisi, multipel emisi, fisi setelah multipel emisi, dan hamburan elastik. Khusus untuk peristiwa fisi dinamika inti majemuk dapat dimodelkan melalui gerak kolektif vibrasi kuadrupol. Gerak vibrasi ini dapat digambarkan melalui kurva potensial energi ikat inti.



**Gambar 23** Ilustrasi pengaruh puncak kurva pada proses deformasi inti ( Diambil dari *Physical Review C* 87 (2013): 054326.).

Gambar 23 memperlihatkan perubahan atau deformasi inti mengikuti naik turunnya potensial inti (Ichikawa, 2013), apabila deformasi telah mencapai keadaan di mana inti tidak bisa kembali ke bentuk semula maka tahap ini dinamakan proses pemutusan. Inilah proses terbelahnya inti majemuk. Kurva potensial pada Gambar 23 beraneka ragam tergantung nuklidanya, adakalanya hanya satu puncak, ada kalanya berbagai puncak.

Penentuan kurva potensial ini mengikuti rumus massa semi empiris dari masa inti (SEMF). Komponen-komponen atau suku pada SEMF cukup banyak, semuanya dibangun dengan pondasi model tetapan cairan (LDM). Kemudian dikembangkan dengan model kolektif yaitu model kolektif vibrasi inti suku kuadrupol.

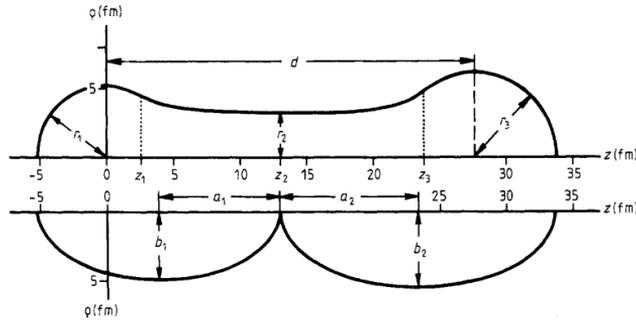
Konsep teoretis dasar yang menjadi dasar pemahaman tentang fisi nuklir tadi berkembang sangat cepat setelah makalah Meitner dan Frisch. Feenberg, Frenkel dan v. Weizsacker menunjukkan secara independen bahwa tetapan bermuatan homogen, bulat, dan klasik akan kehilangan stabilitasnya terhadap deformasi spontan ketika rasio energi elektrostatis dua kali lebih besar dari energi permukaan. Rasio ini, kemudian dikenal sebagai fisilitas. Dalam sebuah makalah penting Niels Bohr dan John A. Wheeler mengembangkan sepenuhnya konsep energi permukaan inti sebagai fungsi

dari serangkaian parameter deformasi. Dengan mempertimbangkan sistematika SEMF, dapat ditunjukkan bahwa peluruhan uranium menjadi lebih dari dua fragmen akan dikaitkan dengan nilai  $Q$  yang lebih besar daripada fisi biner. Akan tetapi, bukan nilai  $Q$  yang menentukan mode peluruhan mana yang benar-benar terjadi, tetapi tinggi *potential barrier* minimal yang harus diatasi dalam hiperpermukaan energi multidimensi sebagai fungsi parameter deformasi pada lintasan peluruhan yang mengarah dari bentuk inti uranium yang padat ke konfigurasi fragmen peluruhannya pada tak terhingga. Dalam dua dimensi, seseorang dapat memvisualisasikan situasi dalam bentuk punggung gunung yang mengelilingi bentuk padat dari keadaan awal. Titik pelana pada punggung itu terbuka ke lembah fisi yang akhirnya mengarah ke dua fragmen yang terpisah dan memanjang.

Melalui efek kulit atau cangkang pada SEMF Strutinsky (Strutinsky, 1975) mengajukan potensial penghalang berpuncuk ganda. Model memberikan penjelasan yang memuaskan untuk sejumlah pengamatan membingungkan dalam fisi. Keberadaan isomer fisi spontan yang berumur pendek, misalnya, dipahami sebagai konsekuensi dari populasi keadaan di sumur kedua (kelas II). Isomer ini memiliki penghalang yang jauh lebih kecil untuk ditembus dan karenanya menunjukkan waktu paruh fisi spontan yang jauh lebih pendek. Perubahan bentuk yang terkait dengan keadaan ini, dibandingkan dengan keadaan kelas I, juga menghalangi pengembalian cepat ke keadaan dasar melalui emisi gamma. (Keadaan kelas II juga disebut isomer bentuk.) Sistematika penampang lintang fisi yang diinduksi neutron dan struktur dalam beberapa distribusi sudut fragmen fisi juga menemukan interpretasi dalam implikasi penghalang berpuncuk ganda.

Deformasi fragmen fisi yang baru ini menghasilkan penjelasan untuk emisi neutron dan  $\gamma$  yang diamati dari fragmen fisi karena pelepasan energi deformasi memberi energi eksitasi yang cukup untuk memungkinkan emisi tersebut.

Teori tentang deformasi terus berkembang, model deformasi yang sangat ampuh untuk memberikan gambaran proses fisi yang lebih baik adalah teori dari Random Neck Rupture Model (Brosa, 1984).



**Gambar 24** Skematik RNRM terhadap LDM (diambil dari 1984 *J. Phys. G: Nucl. Phys.* 10 933)

Inti memanjang dengan leher (setengah bagian atas dan elipsoid ekuivalen setengah bagian bawah). Nukleus saat mengalami deformasi kuadrupol dimodelkan sebagai dua bentuk bola yang dihubungkan oleh sebuah leher. Pemotongan nukleus akan terjadi pada posisi tertentu di leher secara random. Nukleus pada saluran masuk yang memiliki ruptur leher acak mungkin akan berbeda dari proyektil dan target. Secara khusus beberapa transport nukleon di dalam nukleus pada saat kontak sebelum pemutusan mungkin telah terjadi.

Produk akhir proses pemutusan ini dikenal dengan nama produk fisi. Studi hasil fisi memiliki dampak besar pada karakterisasi dan pemahaman proses fisi dan aplikasinya. Produk fisi memiliki pengaruh langsung pada jumlah racun neutron yang membatasi pembakaran bahan bakar dan pada evaluasi panas peluruhan reaktor setelah penghentian. Evaluasi hasil fisi merupakan sintesis pengetahuan eksperimental dan teoretis untuk melakukan estimasi terbaik dari hasil massa dan produk fisi independen. Saat ini, kurangnya korelasi antara berbagai hasil fisi yang dapat diamati menyebabkan beberapa ketidakkonsistenan dalam evaluasi. Misalnya, ketidakpastian hasil massa ditaksir terlalu tinggi sementara hasil yang dapat diamati ini adalah yang paling dikenal. Dalam dekade terakhir ini, berbagai matriks kovariansi telah diusulkan tetapi bagian eksperimentalnya diabaikan. Matriks kovariansi yang konsisten bergantung pada proses evaluasi global dari data hingga model yang digunakan. Kolaborasi ini mengembangkan metodologi baru di bidang produk fisi untuk versi mendatang dari pustaka JEFF yang menggabungkan analisis lembaga CEA dan NNL.

Distribusi massa fragmen yang terbentuk dalam fisi merupakan salah satu fitur paling mencolok dari proses fisi nuklir. Distribusi ini bergantung pada massa nuklir dan energi eksitasi saat fisi terjadi. Pada energi eksitasi rendah,

fisi nuklida seperti uranium-235 atau plutonium-239 bersifat asimetris; yaitu fragmen terbentuk dalam distribusi probabilitas (atau hasil) berpuncuk dua yang mendukung pembagian massa yang tidak sama. Seperti yang akan dicatat, kelompok massa fragmen yang ringan bergeser ke nomor massa yang lebih tinggi saat massa inti fisi meningkat, sedangkan posisi kelompok yang berat tetap hampir diam. Saat energi eksitasi fisi meningkat, probabilitas untuk pemisahan massa yang simetris meningkat, sedangkan probabilitas untuk pembagian asimetris menurun. Dengan demikian, lembah di antara dua puncak meningkat dalam probabilitas (hasil pembentukan), dan pada eksitasi tinggi, distribusi massa menjadi berpuncuk tunggal, dengan hasil maksimum pada simetri. Isotop radium menunjukkan distribusi massa tiga puncak yang menarik, dan nuklida yang lebih ringan dari radium menunjukkan distribusi massa simetris satu puncak. (Namun, nuklida ini memerlukan energi aktivasi yang relatif tinggi untuk menjalani fisi.) Untuk inti yang sangat berat di wilayah fermium-260, kurva hasil massa menjadi simetris (puncuk tunggal) bahkan untuk fisi spontan, dan energi kinetik fragmennya luar biasa tinggi. Pemahaman tentang distribusi massa ini telah menjadi salah satu teka-teki utama fisi, dan interpretasi teoretis yang lengkap masih kurang.

Dapat disimpulkan secara sederhana bahwa untuk peristiwa fisi dengan energi proyektil yang tinggi akan mengakibatkan terbentuknya satu puncak, atau dengan kata lain produk fisi didominasi oleh peristiwa fisi simetris. Sebaliknya apabila proyektil yang akan menumbuk inti target berenergi rendah maka akan terbentuk produk kurva fisi yang asimetrik.

Dalam versi model terbaru, suhu ditambahkan ke dalam perhitungan energi potensial ini. Potensial penghalang akan terbagi menjadi tiga saluran fisi dalam ruang deformasi, yaitu penghalang fisi superpanjang (SL), standar I (ST I), dan standar II (ST II) serta bentuk presisi sebagai fungsi suhu. Dengan cara ini, efek pelelehan cangkang yang tergabung secara alami memunculkan lenyapnya mode fisi asimetris ST I dan ST II dengan meningkatnya energi eksitasi (Brosa, 1999). Pemanfaatan tiga saluran fisi ini adalah untuk perhitungan *fission yield* menggunakan metode monte carlo.

### 2.2.3 Riset Orisinil

Pada bagian ini akan diulas riset orisinil sebagai kontribusi penulis untuk khazanah ilmu data nuklir khususnya data produk fisi.

Riset ini berangkat dari kenyataan bahwa tidak ada model yang mampu menggambarkan semua aspek tipe selama reaksi nuklir. Model tetesan cairan merupakan contoh model yang berhasil menunjukkan fenomena fisi nuklir, di mana N. Bohr dan J. A. Wheeler (Bohr, 1953) mampu menjelaskan energi kinetik partikel bombardir yang diserap oleh inti. Proses ini berlanjut menjadi pembentukan inti majemuk. Energi ini dan pelepasan energi ikat memberikan energi eksitasi tereksitasi di wilayah kontinum (Piekarewicz, 2015). Keadaan nukleon di wilayah kontinum telah dibahas dalam banyak penelitian. Dalam model mainan, R. Kurniadi, dkk. telah menyelidiki penerapan wilayah yang dimaksud (Kurniadi, 2016).

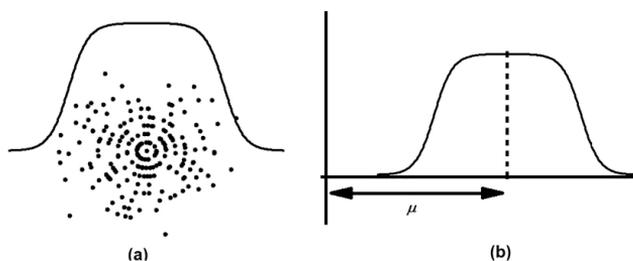
Distribusi massa yang dihasilkan dari proses fisi telah banyak diteliti. Salah satu aspek fisi yang banyak diteliti adalah distribusi massa, yang merupakan salah satu aspek yang menghasilkan data efisiensi fisi. Perhitungan data efisiensi fisi memiliki dua metode utama. Metode pertama bersifat semi-empiris dan metode mikroskopis-makroskopis. Metode semi-empiris terakhir diusulkan oleh Moriyama dan Ohnishi (MO) pada tahun 1974 (Moriyama, 1974). Dalam MO-sistematis ini, distribusi massa digambarkan sebagai penjumlahan dari komponen simetris dan komponen asimetris, yang mana semua komponen diasumsikan berdistribusi Gaussian (Katakura, 2003). Koefisiennya diperoleh dengan menggunakan teknik *curve fitting*. Sayangnya, MO-sistematis tidak memberikan kesesuaian yang baik dengan data eksperimen baru. Katakura melakukan penyempurnaan pada MO-sistematis. Ia menambahkan dua fungsi distribusi Gaussian. Meskipun Katakura berhasil memberikan data yang lebih akurat daripada MO-sistematis, namun pada dasarnya kedua teknik tersebut masih bersifat semi-empiris.

Metode kedua memiliki dua bagian mikroskopis-makroskopis. Makroskopis melihat proses fisi sebagai bentuk evolusi tetesan, tetesan bola awal diubah menjadi dua bola dengan sambungan leher. Hubungan antara energi dan jarak dua bola terpisah memberikan potensi penghalang fisi. Mikroskopis memberikan koreksi untuk penghalang fisi, di mana ia menggunakan koreksi cangkang untuk mengoreksi energi ikatan nuklir. Kode komputer TALYS menerapkan metode mikroskopis-mikroskopis

sepenuhnya untuk menghitung data hasil fisi. Berbeda dari makroskopis-mikroskopis, ada metode yang hanya menggunakan mikroskopis. Pendekatan mikroskopis menggunakan sistem adiabatik dalam proses fisi. Ini menghitung aliran yang melewati garis *split*. Distribusi massa fragmen bergantung pada fluks ini.

Simulasi Monte Carlo dalam proses fisi umumnya menggunakan bilangan acak sebagai nilai fisik yang muncul secara berurutan. Beberapa penulis telah mengembangkan simulasi Monte Carlo dalam proses fisi. Z. Wei (Wei, 2015) pada tahun 2015 telah mengolah simulasi Monte Carlo Geant4 untuk menghitung hasil fisi  $^{232}\text{Th}$ . Geant4 menggunakan lintasan partikel melalui  $^{232}\text{T}$ . A. Deppman menggunakan metode Monte Carlo untuk menentukan karakteristik kompetisi antara penguapan partikel dan proses fisi nuklir. Lemaire (Lemaire, 2005) menggunakan metode Monte Carlo untuk mengambil sampel nilai eksperimen fragmen fisi. Kurniadi menerapkan simulasi Monte Carlo untuk menyimulasikan proses fisi. Proses fisi diilustrasikan dengan tumpang tindih dua distribusi Gaussian fungsi nukleon. Nilai acak mewakili lebar fungsi distribusi. Dua nilai lebar berhubungan dengan peristiwa fisi. N peristiwa fisi menghasilkan kurva hasil fisi. Sebagai model awal, metode ini disebut Fission Toy Model (FTM).

FTM memperlakukan nukleon sebagai partikel titik, yang tidak berinteraksi satu sama lain. Gaya pusat secara implisit mengatur nukleon dalam sebuah nukleus. Gambar di bawah menggambarkan distribusi nukleon untuk nukleus tunggal.

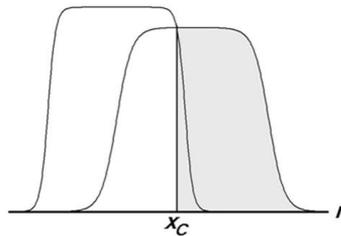


**Gambar 25** (a) Ilustrasi distribusi partikel titik dalam inti atom, (b) ilustrasi untuk parameter  $\mu$ .

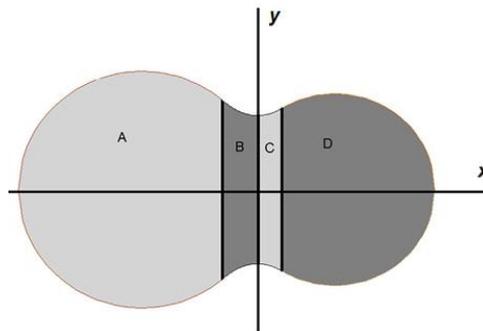
Pada gambar ini, titik-titiknya adalah nukleon dalam sebuah nukleus, sedangkan kurvanya merupakan fungsi distribusi. Fungsi distribusi ini mendistribusikan nukleon dalam nukleus. Distribusi nukleon dalam nukleus mengikuti distribusi fermi dirac, yaitu nukleon didistribusikan hampir merata

di sekitar pusat dan mulai berkurang mendekati jari-jari nukleus. Gaya pusat tidak memiliki hubungan yang jelas dengan fungsi distribusi ini.

FTM memperkenalkan parameter baru (Kurniadi, 2016), parameter ini berperan sebagai bilangan acak dari proses fisi. Setiap nilai acak mengawali satu peristiwa fisi. Gambar berikut ini menunjukkan dua distribusi Fermi yang fungsinya saling tumpang tindih.



**Gambar 26** Tumpang tindih dua distribusi fermi



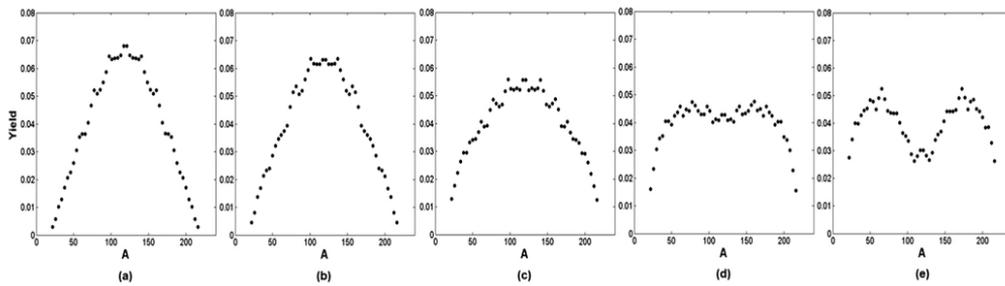
**Gambar 27** Padanan antara kurva fungsi distribusi dengan droplet

Gambar 27 adalah bentuk droplet dari Gambar 26. Droplet tersebut dibangun oleh dua kulit bola A dan D, dan dua permukaan yang dibangun oleh paraboloid B dan C. Ke empat permukaan tersebut memiliki parameter-parameter permukaannya. Parameter-parameter inilah yang ditentukan melalui bilangan acak. Pemutusan pada titik leher diperoleh ketika perpotongan kedua kurva distribusi pada Gambar 26 hampir hilang.

menggambarkan evolusi hasil fisi. Parameter perpindahan digunakan dari yang lebih kecil ke yang lebih besar (kiri ke kanan). Parameter perpindahan yang lebih kecil menyebabkan kurva memiliki satu puncak, sedangkan yang lebih besar menghasilkan kurva memiliki dua puncak. Pada Gambar 28, kurva paling kiri menunjukkan adanya fisi simetris. Dikarenakan parameter

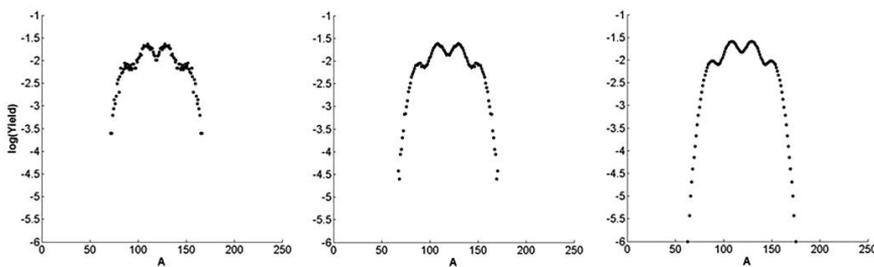
perpindahan memiliki korelasi erat dengan fisi simetris dan asimetris, maka ketebalan permukaan memiliki peran penting dalam pola kurva. Parameter jarak besar yang menyebabkan fisi simetris dapat dijelaskan oleh Gambar 26. Pada Gambar 26, distribusi nukleon yang tajam di tepinya memberikan kepastian keanggotaan dalam inti. Berdasarkan distribusi datar, probabilitas ketebalan permukaan memiliki nilai yang sama di dua sisi. Situasi ini memberikan nukleon didistribusikan secara proporsional di dua sisi.

Data hasil fisi eksperimental menunjukkan bahwa fisi simetris biasanya terjadi pada energi yang lebih tinggi. Kondisi ini memberikan informasi fisik tentang parameter perpindahan. Energi partikel datang memiliki korelasi dengan parameter perpindahan.



**Gambar 28** Hasil fisi dari berbagai parameter perpindahan

Jumlah peristiwa fisi memengaruhi hasil fisi secara signifikan. Gambar 29 kanan menunjukkan hasil dari 105 peristiwa fisi. Hasil fisi tengah diperoleh dari 104 peristiwa fisi, dan gambar kiri adalah 103 peristiwa fisi. Gambar 29 menjelaskan dengan jelas konsistensi aspek statistik FTM (Kurniadi, 2018). Semakin banyak jumlah peristiwa fisi menyebabkan munculnya peristiwa probabilitas kecil.



**Gambar 29** Hasil fisi dihasilkan dari berbagai jumlah peristiwa fisi

Distribusi Fermi nukleon yang memiliki ciri ketebalan permukaan telah diusulkan dalam penelitian ini. Hasil perhitungan menunjukkan hubungan yang kuat antara ketebalan permukaan dan hasil fisi.

Nilai ketebalan permukaan yang besar menyebabkan hasil fisi cenderung bernilai lebih tinggi pada interval nomor massa yang kecil, sedangkan variasi ketebalan permukaan terhadap nilai rata-rata memberikan interval nomor massa yang lebih besar. Sesuai dengan hasil fisi eksperimental, parameter ketebalan permukaan dapat diartikan sebagai energi partikel insiden. Dikarenakan parameter ketebalan dihasilkan oleh generator acak, maka generator acak hampir tidak mempengaruhi hasil hasil fisi. Acak Gaussian memberikan rentang nilai hasil fisi yang lebih besar daripada acak datar, maka distribusi Gaussian parameter ketebalan lebih baik daripada acak datar.

Meskipun acak Gaussian dapat mencapai nilai hasil fisi yang kecil, jumlah peristiwa fisi merupakan kondisi yang sangat penting untuk menghasilkan nilai hasil fisi yang kecil. Dengan menggunakan peristiwa fisi yang lebih besar, penelitian ini memiliki konsistensi dengan aspek statistik.

Studi lain tentang fisi dapat dilihat pula melalui potensial deformasinya. Proses fisi biasanya dilihat secara mikroskopis dan makroskopis. Tinjauan ini memerlukan studi tentang jenis dan kuantitas parameter deformasi nuklir. Setiap proses fisi harus melibatkan evolusi bentuk inti. Oleh karena itu, studi ini sangat penting.

Pada tahun 1965 Lawrence (Lawrence, 1965) memperkenalkan bentuk inti atom sebagai permukaan yang dinyatakan dalam sistem koordinat silinder. Parameternya adalah koefisien polinomial. Bentuk Lawrence ini kemudian dirujuk oleh J. R Nix. Nix (Nix, 1969) membagi inti atom menjadi tiga bagian, yaitu dua bagian berbentuk elipsoid dan satu bagian berbentuk hiperboloid. Setiap bagian memiliki pusat dan variabel pelengkap. Terdapat sembilan parameter dalam model bentuk inti atom Nix, yaitu dua pusat elipsoid, satu pusat hiperboloid, dua sumbu mayor, dua sumbu minor, dan dua titik kontinuitas. Bentuk inti atom Nix diadopsi oleh Sierk. Sierk menggunakan parameter bentuk ini untuk menggambarkan model inti atom berputar makroskopisnya. Menurutnya, inti atom yang ringan memiliki leher yang kecil. Oleh karena itu, parameter Nix sangat cocok untuk digunakan. Selain itu, bentuk inti atom digambarkan oleh bagian-bagian tiga bola revolusi yang

saling terhubung dengan mulus. Parameter bentuk ini dapat menggambarkan rotasi inti atom. Hasil ini menunjukkan keberhasilan bentuk nuklir Nix.

Lima tahun sebelumnya, Moler memperkenalkan Finite Range Droplet Model-FRDM. FRDM adalah model droplet yang berasal dari minimisasi energi parameter yang terlibat dalam penghitungan massa inti. Moler menggunakan parameter bentuk Nix untuk model tersebut. Aplikasi Parameter Nix dapat dilihat saat menentukan Potensial Yukawa terlipat. FRDM sangat ampuh untuk menentukan massa nuklir. FRDM berbeda dari Liquid Drop Model – LDM. FRDM memperhatikan interaksi antara nukleon, sedangkan LDM tidak. Sejak saat itu, studi tentang model mikroskopis-makroskopis telah muncul, baik dalam bentuk FRDM improvisasi maupun aplikasinya, tetapi semuanya masih bertumpu pada parameter bentuk yang sama. Hingga saat itu muncul Random Neck Rupture Model – RNRM. RNRM merupakan improvisasi dari model Nix dan merupakan generalisasi dari bentuk Lawrence.

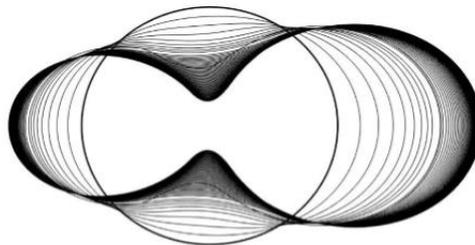
Brosa memperkenalkan random breakpoint pada neck. Alasan Brosa adalah karena terdapat bukti sifat acak breakpoint fisi nuklir. Dengan demikian RNRM secara tidak langsung memperkenalkan dinamika neck. Akibatnya, terdapat beberapa penelitian yang terkait dengan dinamika neck ini. Selain dinamika model neck, Brosa mendorong munculnya penelitian tentang aplikasi sifat acak pada besaran fisi lainnya. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa Random Neck dapat mendukung perhitungan data nuklir untuk teknologi nuklir secara umum (Shibata, 2012).

Meskipun RNRM telah berhasil dalam semua aspek perhitungannya, masih ada ruang untuk perbaikan. Salah satu kemungkinan pengembangan dalam RNRM adalah menerapkan distribusi probabilitas nukleon dalam nukleus. Studi ini menggambarkan nukleon sebagai partikel terdistribusi dengan fungsi distribusi tertentu selama fisi. Teknik ini memandang nukleon sebagai partikel tak berdimensi yang hanya melibatkan interaksi coulomb. Lebih jauh, metode ini mencoba menggambarkan secara kasar bagaimana distribusi nukleon berubah seiring waktu. Dikarenakan alasan ini, metode ini disebut model mainan fisi—FTM.

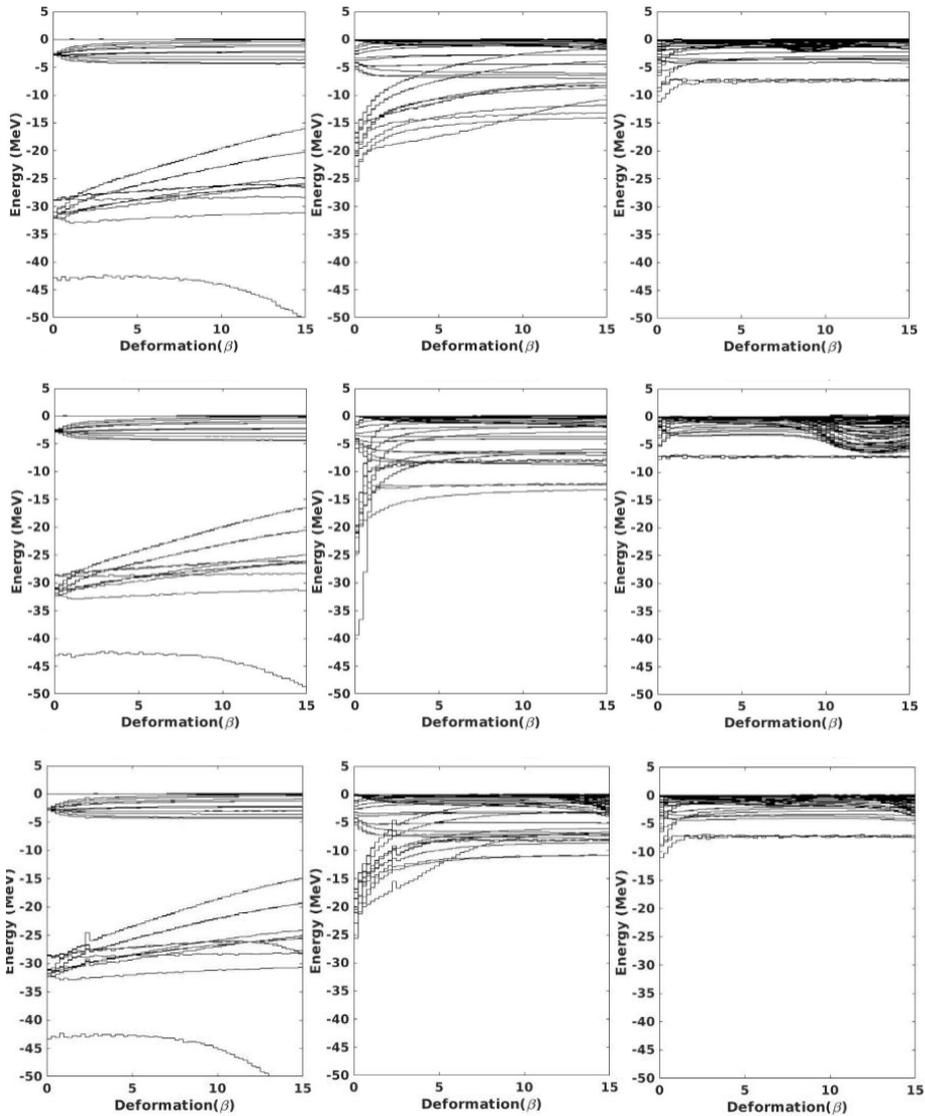
Selain dari segi sifat acak, karya ini telah mengembangkan bentuk inti yang mirip dengan RNRM. Pengembangan ini dapat dilakukan asalkan representasi bentuk harus memiliki tiga derajat kebebasan esensial

(peregangan inti, penipisan leher, dan deformasi hingga asimetri). Ada dua hal yang membedakan RNRM dengan karya ini: a. Polinomial yang digunakan untuk kepala masih menggunakan polinomial Legendre, sedangkan untuk leher mengikuti RNRM; b. Sisipkan parameter gamma  $\Gamma$  (parameter fraksi). Tujuan penyisipan parameter gamma melibatkan fraksi fragmen sebagai bagian dari *input* perhitungan dalam menentukan penghalang fisi.

Semua tahapan mengikuti prosedur yang telah dilakukan oleh penelitian sebelumnya. Dengan demikian, hal baru dari penelitian ini adalah menambahkan parameter  $\Gamma$  pada proses perhitungan.  $\Gamma$  berfungsi sebagai parameter input yang memberikan informasi tentang jenis saluran *output* yang akan dihasilkan dari suatu proses fisi; dengan demikian, parameter ini menjadi panduan untuk menghasilkan produk fisi tertentu. Dikarenakan produk fisi dihasilkan dari berbagai kemungkinan saluran *output*, maka semakin banyak nilai  $\Gamma$  yang digunakan, semakin baik pula hasil yang diperoleh. Pada penelitian ini, hanya digunakan tiga nilai  $\Gamma$ ; alasan pemilihan ketiga nilai tersebut adalah agar lebih mudah membandingkan pengaruh nilai  $\Gamma$  yang berbeda pada setiap tahap perhitungan. Meskipun hanya menggunakan tiga nilai  $\Gamma$ , energi deformasi yang dihasilkan masih cukup baik karena energi deformasi total merupakan energi deformasi rata-rata yang dihasilkan dari setiap nilai  $\Gamma$ . Untuk melihat peran  $\Gamma$ , mulailah dari yang paling awal, yaitu bentuk droplet. Pada model ini, batas permukaan inti ditentukan melalui persamaan radius inti yang diilustrasikan oleh gambar berikut.

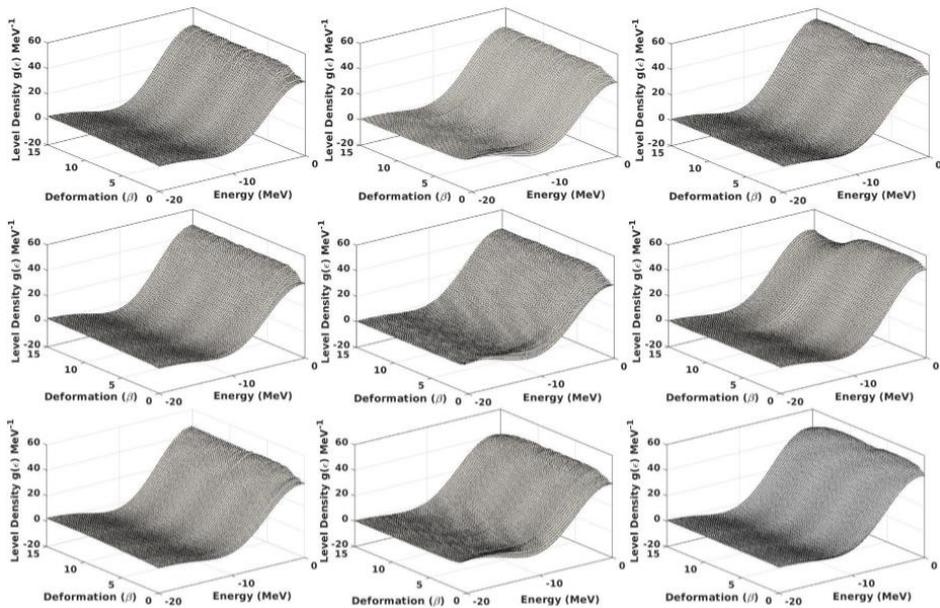


**Gambar 30** Representasi evolusi tetesan dalam berbagai nilai parameter deformasi



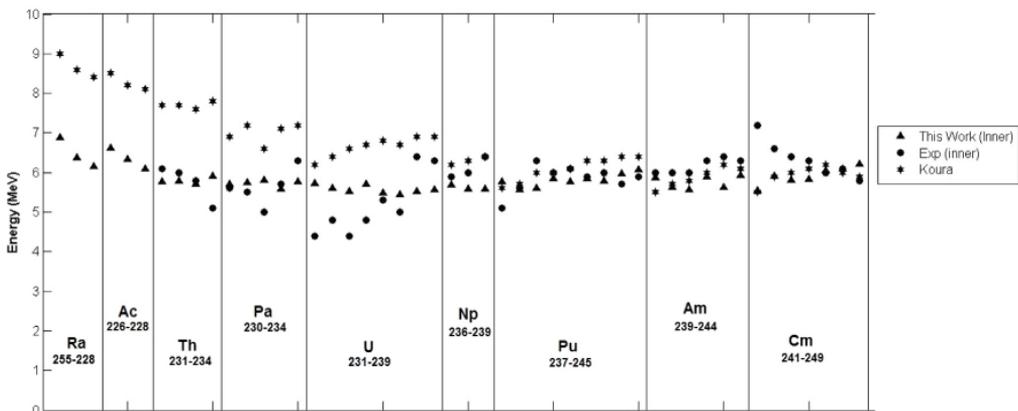
**Gambar 31** Tingkat Energi  $^{238}\text{U}$  untuk (Baris Pertama)  $\Gamma = 0,25$ ,  $\eta = 0,0$  (kiri),  $0,25$  (tengah), dan  $0,75$  (kanan), (Baris Kedua)  $\Gamma = 0,5$ ,  $\eta = 0,0$  (kiri),  $0,25$  (tengah), dan  $0,75$  (kanan), (Baris Ketiga)  $\Gamma = 0,75$ ,  $\eta = 0,0$  (kiri),  $0,25$  (tengah), dan  $0,75$  (kanan)

Setelah mengetahui pengaruh tingkat-tingkat energi akibat nilai  $\Gamma$  yang bervariasi kemudian dapat diperoleh nilai kerapatan tingkat-tingkat energi tersebut. Gambar 32 berikut ini adalah kerapatan dari tingkat-tingkat energi yang dihasilkan.



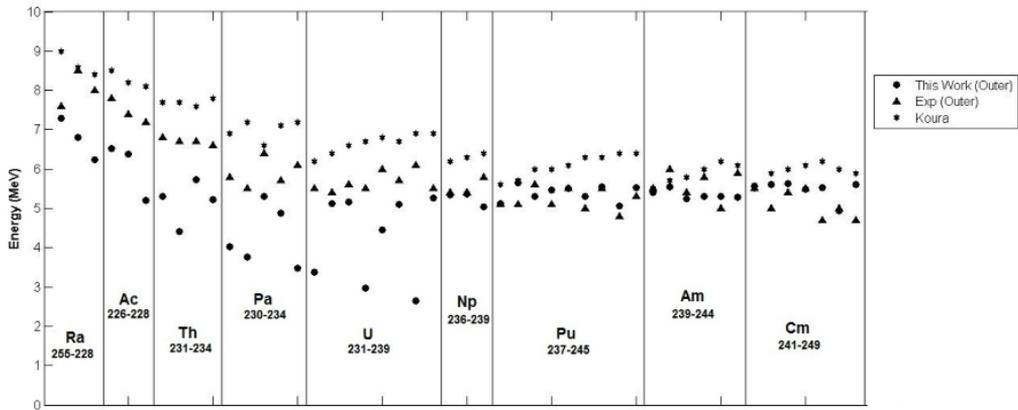
Gambar 32 Hasil perhitungan kerapat tingkat-tingkat energi

Kerapatan tingkat-tingkat energi ini akan memberikan potensial penghalang dengan puncak-puncaknya sebagai berikut.



Gambar 33 Tinggi penghalang potensial dihitung dari pekerjaan ini untuk membandingkannya dengan data bagian dalam eksperimen.

Gambar 33 memperlihatkan hasil perhitungan dan membandingkannya dengan data hasil pengamatan eksperimen untuk data bagian dalam, sedangkan perbandingan dengan data bagian luar diperlihatkan pada Gambar 34 berikut.



**Gambar 34** Tinggi penghalang potensial dihitung dari pekerjaan ini untuk membandingkannya dengan data bagian luar eksperimen.

Tingkat energi yang diperoleh dari model potensial untuk gambar ditunjukkan oleh Gambar 31 di atas. Gambar-gambar ini menggambarkan bagaimana nilai parameter fraksi  $\Gamma$  dan jarak antara pusat massa  $\eta$  memengaruhi tingkat energi. Parameter  $\Gamma$  berperan dalam menentukan jenis nuklida yang dihasilkan oleh proses fisi. Sementara itu, nilai parameter  $\eta$  memengaruhi jarak antara pusat massa nuklida-nuklida ini (Fink, 1974, Maruhn, 1980).

Gambar 31 menunjukkan tiga ilustrasi tingkat energi yang dihasilkan di mana tidak ada alasan khusus untuk pemilihan nuklida  $^{238}\text{U}$  dalam perhitungan tingkat energi yang dilakukan. Gambar tersebut merupakan satu-satunya representatif dari semua perhitungan yang dilakukan. Gambar kiri merupakan tingkat energi inti yang akan mengalami fisi dengan parameter  $\Gamma = 0,25$  dan parameter  $\eta = 0\%$ . Parameter  $\Gamma = 0,25$  berarti bahwa produk fisi nuklida adalah 25% dan 75% dari total massa. Sementara parameter  $\eta = 0\%$  berarti bahwa jarak antara dua pusat massa adalah 0% dari panjang droplet. Dalam gambar ini, ketika inti belum mengalami deformasi, energi tingkat hampir terkumpul pada lima tingkat saja.

Meskipun nukleus mengalami deformasi, pusat massa kedua nuklida masih berada pada titik yang sama. Meskipun masih berkumpul di sekitar bagian tengah leher tetesan, nukleon telah terdistribusi berdasarkan nilai fraksi yang diberikan. Peningkatan nilai parameter deformasi  $\beta$  secara signifikan memengaruhi tingkat energi yang dihasilkannya. Jelas bahwa

semakin besar nilai  $\beta$ , semakin menyebar tingkat energinya. Situasi ini menunjukkan bukti konsistensi pertama model tetesan ini (Ring, 2004).

Deformasi tetesan secara tidak langsung mendistribusikan nukleon menurut pola deformasi spasialnya, di mana distribusi nukleon secara signifikan memengaruhi perubahan lokasi tingkat energi dalam nukleus. Meskipun deformasi tetesan memiliki efek yang kuat pada perubahan lokasi tingkat energi, deformasi ini tidak dapat meningkatkan tingkat energi ke keadaan hampir tereksitasi di luar nukleus. Akibatnya, parameter Fraksi tidak memengaruhi pembentukan pelepasan nukleon masif (misalnya, spalasi neutron). Dengan demikian, nilai parameter  $\Gamma$  secara konsisten hanya terkait dengan pembentukan fraksi nuklida.

Model droplet yang melibatkan parameter Fraksi  $\Gamma$  tidak memengaruhi inti fisi secara mikroskopis. Inti fisi tunduk pada pembagian nukleon sesuai dengan nilai parameter fraksi. Koordinat fragmentasi  $\eta$  memiliki pengaruh yang kuat pada struktur inti yang akan mengalami fisi. Tidak ada korelasi yang signifikan antara fraksi dan koordinat fragmentasi  $\eta$ .

Berdasarkan gambar kepadatan tingkat partikel tunggal di atas, tanpa kontribusi koordinat fragmentasi  $\eta$ , fraksi  $\Gamma$  tidak dapat berkontribusi secara signifikan terhadap koreksi cangkang massa nuklir. Seperti disebutkan di atas, bentuk parameter baru lebih akurat dalam menghasilkan perhitungan penghalang fisi puncak daripada FRDM dan lainnya. Lebih jauh, model ini menawarkan fleksibilitas dengan adanya aplikasi multisaluran langsung dalam proses fisi yang sedang berlangsung.

Dikarenakan parameter fraksi tidak memengaruhi struktur, maka parameter tersebut dapat digunakan sebagai parameter acak yang mengikuti fungsi distribusi tertentu. Karena angka acak memodelkan peristiwa fisi, maka perlu untuk menghasilkan berbagai nilai yang mungkin untuk parameter bentuk tetesan secara acak guna mengakomodasi semua kemungkinan yang terjadi.

Kesimpulan terpenting dari karya ini adalah peluang untuk menggunakan data eksperimen tentang fragmentasi massa produk reaksi fisi dalam menghitung tinggi penghalang fisi. Melalui penghalang fisi ini, data fragmentasi massa yang lengkap dapat dihasilkan secara teoretis. Berikutnya

adalah bagaimana melakukan penerapannya pada perhitungan data nuklir untuk kurva produk fisi.

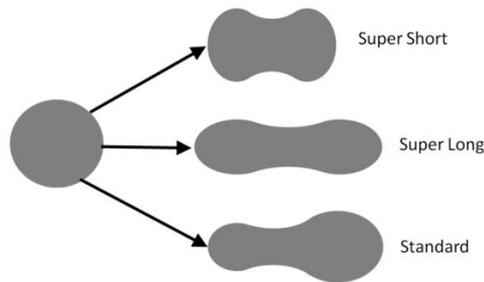
Dalam pustaka data nuklir utama seperti ENDF, JENDL, JEFF, dan CENDL, evaluasi lengkap hasil produk fisi (FPY-Fission product yield) hanya tersedia untuk energi insiden neutron sekitar 0,0253 eV, 0,5 MeV, dan 14 MeV. Sebaliknya, data masih perlu diselesaikan untuk energi insiden neutron lainnya, tetapi data tersebut juga memiliki ketidakpastian yang signifikan. Di sisi lain, deskripsi teoretis prediktif FPY masih diperlukan.

Model nuklir mikroskopis mempertimbangkan sistem banyak-benda kuantum nukleon yang disatukan oleh gaya nuklir yang kuat. Oleh karena itu, model-model ini memberikan deskripsi akurat tentang dinamika nukleon dalam sistem nuklir. Namun, untuk aplikasi fisi seperti FPY, perhitungan menggunakan model-model ini menjadi sangat rumit dan mahal. Oleh karena itu, meskipun fitur fisik model ini menguntungkan karena deskripsi dinamika distribusi nukleon yang akurat, model-model ini masih perlu dipersiapkan untuk aplikasi kuantitatif yang akurat dalam fisi nuklir. Di sisi lain, model tetesan cairan (LDM), yang juga dikenal sebagai model makroskopis, memiliki sudut pandang yang berbeda. Alih-alih nukleon, parameter deformasi kolektif inti atom menjadi derajat kebebasan dan interaksi karena interaksi Coulomb dari proton dan tegangan permukaan kolektif. Dibandingkan dengan model mikroskopis, perhitungan prediksi permukaan energi potensial dari model-model ini relatif kurang rumit tetapi kurang akurat. Model mikro-makro (mic-mac) memperbaiki kekurangan yang ditemukan dalam model makroskopis. Model-model ini memberikan koreksi mikroskopis pada permukaan energi potensial makroskopis. Oleh karena itu, prediksi FPY dari model-model ini menjadi relatif lebih akurat daripada model makroskopis. Namun, model mic-mac tetap kurang ekonomis untuk menyediakan informasi data nuklir yang dievaluasi.

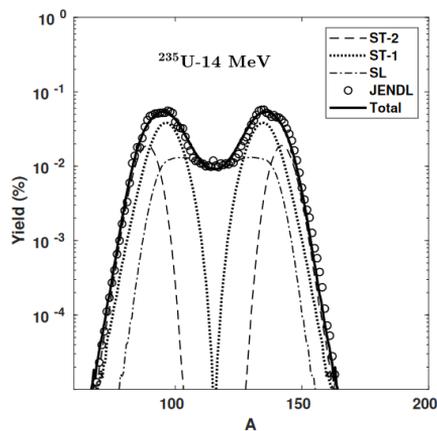
Pilihan lain untuk evaluasi FPY yang akurat dan efisien terhadap data nuklir adalah teknik yang dikembangkan menggunakan statistik dan pemrosesan data tingkat lanjut. Teknik ini dikenal sebagai analisis berbasis pembelajaran mesin. Teknik ini memprediksi data ekstrapolasi yang diperoleh dari data yang ada tanpa memerlukan terlalu banyak aspek fisik sebagai masukan. Keuntungan dari teknik ini adalah semakin banyak data yang tersedia, semakin baik prediksi data ekstrapolasi yang diperoleh.

Teknik jalan tengah ini dipilih dengan mempertimbangkan hal-hal berikut: 1) Ketersediaan data eksperimen pada beberapa titik penting atau keberadaan data hasil fisi yang dievaluasi. 2) Penggunaan bilangan acak sebagai inisiator terjadinya peristiwa pembelahan. 3) Memperhatikan keberadaan mode fisi. 4) Keberadaan kurva distribusi nukleon sebagai alat untuk menggambarkan distribusi nukleon dalam fragmen.

Teknik ini dimulai dengan menentukan fungsi keadaan nukleon. Fungsi keadaan nukleon menggambarkan probabilitas menemukan nukleon di ruang yang dibatasi oleh permukaan inti. Ruang yang dipilih bersifat homogen dalam x-y. Selanjutnya, tiga saluran fisi, SL-super long, ST1-standard, dan ST2-super short, disisipkan untuk menentukan fungsi total fragmen keadaan nukleon yang kami sebut fungsi pemasangan. Ilustrasi saluran fisi ini diperlihatkan pada gambar berikut.



**Gambar 35** ilustrasi mode fisi yang dipertimbangkan dalam karya ini. Leher adalah penghubung antara dua bola inti.



**Gambar 36** Produk fisi tersusun dari tiga saluran SL, ST1, ST2

Karya ini mengusulkan teknik perhitungan data fisi nuklir yang efisien dan akurat berdasarkan LDM, khususnya untuk aplikasi FPY, tanpa kehilangan terlalu banyak aspek fisik, seperti dinamika nukleon selama proses fisi. Di sini, mempertimbangkan dinamika nukleon secara klasik. Teknik ini terutama melihat sifat stokastik peristiwa fisi. Sifat ini muncul ketika peristiwa fisi secara acak menghasilkan produknya. Nukleon akan didistribusikan sesuai dengan peristiwa stokastik yang dibentuk oleh permukaan nuklir di ruang.

Hasil fisi yang diperoleh dari data yang sesuai sangat mendekati data referensi. Selain itu, hasil lain diperoleh dalam distribusi nukleon kumulatif dari seluruh proses fisi. Distribusi kumulatif ini menunjukkan adanya daerah dengan konsentrasi nukleon yang cukup tinggi. Akibatnya, nukleon tidak tersebar secara terus-menerus.

Teknik ini juga berhasil memunculkan fenomena tiga mode fisi yang biasa terjadi, yaitu superlong (SL), Standard-1 (ST1), dan Standard-2 (ST2). Superlong memiliki porsi yang jauh lebih kecil pada energi rendah dibandingkan dengan mode lainnya. Seiring dengan meningkatnya energi neutron, porsi superlong juga ikut meningkat. ST1, sebagaimana hasil perhitungan ini, menunjukkan adanya penurunan porsi; perilaku ini karena semakin besar energi neutron yang masuk, semakin banyak pula jumlah produk fisi yang mendekati fisi simetris. Oleh karena itu, seiring berjalannya waktu, lembah akan terangkat dan menjadi landai atau datar. Dengan kata lain, hilangnya atau berkurangnya porsi ST1 menyebabkan fisi menghasilkan kurva dengan hanya satu puncak. Di sini, superlong merupakan kondisi di mana nukleon cenderung berada paling jauh dari pusat massanya. Sebaliknya, ST1 merupakan kondisi di mana nukleon-nukleon tersebar hampir merata di mana-mana. ST2 digambarkan sebagai keadaan nukleon yang berkumpul di pusat dan titik terjauh dari pusat massa. Dengan mengakumulasi semua mode, probabilitas keberadaan nukleon dalam fragmen pada pra-pemotongan bersifat diskrit. Meskipun distribusi angka acak bersifat datar, hasil posisi probabilitas tidak kontinu.

### 3 APLIKASI DATA NUKLIR

Perluasan teknologi nuklir selama beberapa puluh tahun terakhir telah menciptakan permintaan yang semakin besar akan informasi nuklir yang terorganisasi dan mudah diakses yang dibutuhkan oleh komunitas ilmiah. Saat ini, tren dalam industri tenaga nuklir adalah pengembangan reaktor nuklir yang lebih efisien dan perencanaan reaktor fusi termonuklir. Dengan meningkatnya penggunaan metode dan teknik nuklir di hampir semua bidang sains dan teknologi berakibat meningkatnya permintaan akan informasi besaran-besaran fisis dari fisika nuklir berupa angka numerik yang lebih banyak dan lebih baik, yang umumnya disebut sebagai data nuklir.

Data nuklir mencakup berbagai macam struktur dan kuantitas reaksi seperti hamburan dan penampang lintang reaksi, yang umumnya diberikan sebagai fungsi energi dan sudut, massa nuklir, sifat level, serta mode dan parameter peluruhannya, spektrum neutron dan foton dari reaksi, dan masih banyak lagi. Semua ini diperlukan untuk setiap isotop nuklir dan reaksinya yang melibatkan neutron, proton, deuteron, alfa, dan foton. Jika data terukur tidak tersedia, prediksi model terkadang digunakan sebagai pengganti.

Data nuklir menyediakan landasan empiris untuk studi tentang energi nuklir, keselamatan, keamanan, perlindungan, dan banyak bidang sains lainnya. Data nuklir memungkinkan teknologi yang membantu melindungi lingkungan.  $^{65}\text{Zn}$  dan  $^{54}\text{Mn}$  digunakan untuk mempelajari aliran kontaminan logam berat dalam air limbah pertambangan,  $^3\text{H}$  digunakan untuk mempelajari limbah cair,  $^{137}\text{Cs}$  membantu melacak erosi dan pengendapan tanah, dan radiografi neutron digunakan untuk mengkarakterisasi kontaminan dalam berbagai sampel lingkungan. Data nuklir juga membantu mengarakterisasi dan memodifikasi material untuk berbagai keperluan, mulai dari  $^{60}\text{Co}$  yang digunakan untuk menguji kesesuaian dan keawetan wadah penyimpanan semen dan dinding reaktor, hingga hamburan neutron yang digunakan untuk menguji sifat magnetik yang tidak biasa dari material kuantum, dan implantasi ion selenium untuk doping semikonduktor.

Selain itu data nuklir juga memberikan wawasan untuk memahami dunia. Data ini sangat penting dalam penemuan Higgs boson, karena data ini menentukan bagaimana partikel berinteraksi dengan detektor. Penanggalan radioaktif dengan  $^{14}\text{C}$  memberikan pemahaman sejarah yang lebih mendalam.

Iradiasi ion berat digunakan untuk memahami bagaimana chip komputer akan bertahan dari pemboman sinar kosmik, sehingga memungkinkan perjalanan luar angkasa yang aman. Dan wahana penjelajahan luar angkasa Voyager telah ditenagai oleh  $^{238}\text{Pu}$  sejak diluncurkan pada tahun 1977.

Perpustakaan data nuklir yang andal, terkini, dan terorganisir juga sangat diperlukan bagi para peneliti fisika nuklir, yang membutuhkan data untuk meningkatkan pengetahuan mereka dari penelitian yang ada dan untuk merencanakan kegiatan masa depan yang dapat mengarah pada penemuan-penemuan baru. Berikut ini akan dipaparkan beberapa contoh aplikasi data nuklir dari sekian banyak aplikasi yang ada.

### **3.1 Kedokteran Nuklir**

Kedokteran nuklir tidak hanya mencakup diagnostik tetapi juga aplikasi terapi radioisotop, dengan keberhasilan dalam mengobati gangguan tiroid jinak dan ganas melalui radioiodin merupakan alasan utama untuk menetapkan kedokteran nuklir sebagai disiplin medis yang independen. Terapi radioiodin juga menetapkan prinsip teranostik, yaitu penggunaan target untuk pencitraan radionuklida dan terapi. Prinsip teranostik kemudian berhasil diterapkan pada neuroblastoma, limfoma, tumor neuroendokrin, paraganglioma, dan baru-baru ini, kanker prostat. Berikut ini adalah beberapa aplikasi data nuklir pada kedokteran nuklir

#### **3.1.1 Onkologi**

Onkologi adalah ilmu kedokteran yang fokus pada penyakit kanker. Sementara dokter yang mendalami ilmu kedokteran onkologi disebut dokter onkolog. Pengobatan nuklir merupakan cara yang ampuh untuk mengobati kanker. Pengobatan ini menggunakan obat-obatan radioaktif khusus yang disebut radiofarmasi yang mencari dan menghancurkan sel-sel kanker.

Kedokteran Nuklir menawarkan metode penyaringan untuk onkologi seperti skintigrafi tulang dan sumsum tulang. Selama dua dekade terakhir, prosedur khusus telah memperoleh aplikasi yang luas. Pada pasien dengan kanker tiroid,  $^{131}\text{I}$  masih memainkan peran yang signifikan.<sup>67</sup> Ga masih memiliki indikasinya pada limfoma, sementara pada penyakit lain  $^{201}\text{Tl}$  klorida sekarang menjadi agen pilihan. Khususnya pada kanker tiroid,  $^{201}\text{Tl}$

telah terbukti menjadi radiofarmasi pencitraan tumor yang andal. Baru-baru ini,  $^{99}\text{Tc}$ -mMIBI diperkenalkan untuk pencitraan tumor.  $^{99}\text{Tc}$ -mHMPAO juga dapat digunakan untuk skintigrafi tumor, khususnya pada lesi otak. Selain itu,  $^{123}\text{I}$ -IMP telah berhasil digunakan untuk pencitraan melanoma ganas.

Bidang diagnosis tumor lain yang menjanjikan adalah pencitraan reseptor. Pada neuroblastoma dan feokromositoma ganas,  $^{131/123}\text{I}$ - mIBG merupakan radiofarmasi pilihan dan dapat juga dipertimbangkan sebagai agen pencitraan reseptor. Hasil klinis pertama dengan oktreotida  $^{111}\text{In}$  menunjukkan potensi sebagai radiofarmasi reseptor somatostatin pada insulinoma, karsinoma sel islet, kanker meduler dan paru, sementara estradiol  $^{123}\text{I}$  memerlukan beberapa perbaikan hingga dapat direkomendasikan sebagai alat diagnostik pada kanker payudara.

Sejak tahun 1978, antibodi tumor poliklonal atau monoklonal berlabel radioaktif dan fragmennya telah memperoleh aplikasi yang luas. Terutama antibodi melanoma  $^{99}\text{Tc}$  225.28S,  $^{131}\text{I}$  atau  $^{99}\text{Tc}$ CEA dan antibodi OC-125 berlabel In-111/I-131 telah terbukti memiliki signifikansi klinis pada melanoma, kanker kolorektal dan ovarium. Isotop-isotop yang disebutkan di atas adalah sebagian dari banyak isotop yang digunakan dalam kedokteran nuklir. Selain untuk Okologi radioisotop ini pun digunakan pula untuk pengobatan nuklir yang lainnya.

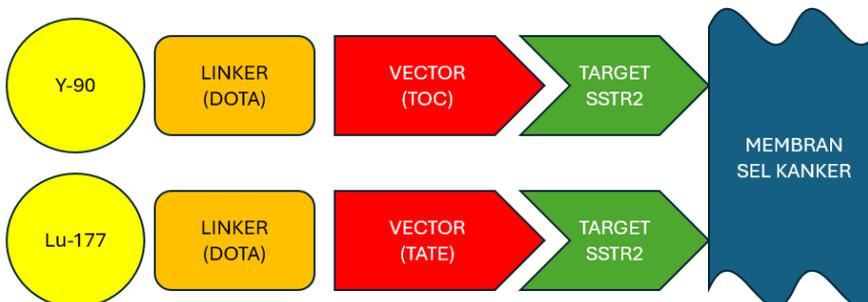
### **3.1.2 Teranostik**

Teranostik dimulai oleh Saul Hertz pada tahun 1941 dengan keberhasilan pengobatan penyakit tiroid ganas dan jinak dengan yodium radioaktif, radiofarmasi theranostic pertama. Teranostik adalah gabungan dari istilah terapi dan diagnostik. Teranostik adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan kombinasi penggunaan satu obat radioaktif untuk mengidentifikasi (mendiagnosis) dan obat radioaktif kedua untuk memberikan terapi guna mengobati tumor utama dan tumor metastasis. Sel tumor memiliki cangkang, yang disebut membran; ada protein tertentu seperti reseptor somatostatin (SSTR2) pada membran sel tumor yang dapat berfungsi sebagai target obat kanker.



**Gambar 37** Proses injeksi obat diagnostik radioaktif

$^{68}\text{Ga}$  DOTATOC adalah obat diagnostik radioaktif yang menargetkan SSTR2.  $^{68}\text{Ga}$  DOTATOC disuntikkan ke dalam vena pasien dan mengalir melalui aliran darah ke semua organ dan jaringan tubuh. Jika pasien memiliki tumor neuroendokrin dengan SSTR2 pada membran sel tumor,  $^{68}\text{Ga}$  DOTATOC akan mengikat SSTR2 dan tumor akan menyala pada pemindaian PET. Setelah kanker neuroendokrin didiagnosis menggunakan  $^{68}\text{Ga}$  DOTATOC dan pemindaian PET,  $^{68}\text{Ga}$  dapat digantikan dengan radionuklida lain, seperti lutetium-177 ( $^{177}\text{Lu}$ ) atau yttrium-90 ( $^{90}\text{Y}$ ), yang dapat menargetkan dan membunuh sel tumor yang memiliki SSTR2 pada membrannya.



**Gambar 38**  $^{90}\text{Y}$ -DOTATOC dan  $^{177}\text{Lu}$ -DOTATATE keduanya disuntikkan ke pembuluh darah pasien secara simultan

Terapi  $^{90}\text{Y}$ -DOTATOC dan  $^{177}\text{Lu}$ -DOTATATE dapat disuntikkan ke pembuluh darah pasien dan mengalir ke bagian tubuh mana pun yang memiliki protein SSTR2. Obat terapeutik ini mengikat protein SSTR2 seperti kunci pada gembok, yang memungkinkan obat memasuki sel tumor dan membunuhnya dengan merusak DNA sel tersebut. Sel sehat di sekitar tumor yang tidak memiliki protein SSTR2 pada membrannya tidak terpengaruh oleh obat tersebut. Agen diagnostik dan agen terapeutik baru sedang dikembangkan untuk digunakan dalam identifikasi, diagnosis, dan pengobatan tumor neuroendokrin. Obat teranostik ini akan memungkinkan

dokter untuk mempersonalisasi pengobatan berdasarkan jenis kanker yang sangat spesifik dan protein membran sel tumor spesifik yang mungkin dimiliki setiap pasien.

### **3.1.3 Neurologi**

Pencitraan otak fungsional dengan tomografi terkomputasi emisi foton tunggal (SPECT) dan tomografi emisi positron (PET) memungkinkan studi in vivo dari proses neurokimia tertentu dalam konteks mekanisme pengaturan normal dan perubahan patofisiologis otak. Studi reseptor dengan SPECT dan PET telah difokuskan pada okupansi selama perawatan obat, kuantifikasi dalam penyakit neuro psikiatri, dan visualisasi patologi tertentu. Pencitraan SPECT dan PET dari transporter dopamin dapat memainkan peran penting dalam mendeteksi degenerasi neuronal pada sindrom parkinson dan neurotoksisitas yang diinduksi obat.

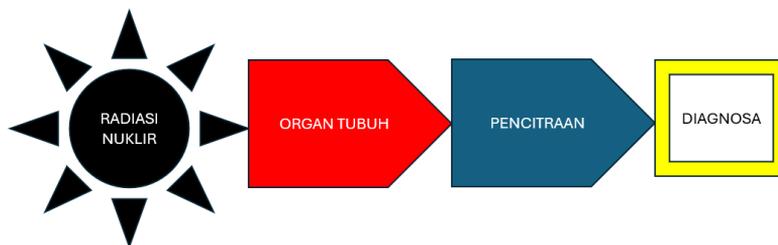
### **3.1.4 Kardiovaskular**

Aplikasi kardiovaskular dari kedokteran nuklir telah difokuskan pada penilaian perfusi miokard, fungsi, dan viabilitas pada penyakit jantung iskemik, untuk memandu intervensi revaskularisasi. Meskipun ada kemajuan yang stabil dalam teknologi pencitraan, pencitraan yang benar-benar ditargetkan secara molekuler belum berkontribusi pada pengobatan kardiovaskular klinis dengan cara yang mirip dengan onkologi atau neurologi. Perbedaan ini paling baik dijelaskan oleh fakta bahwa kardiologi sejauh ini didominasi oleh terapi intervensi mekanis dan terapi obat yang dapat diterapkan secara luas dan digeneralisasi, di mana pencitraan molekuler yang ditargetkan (yang bekerja paling baik dalam kombinasi dengan terapi molekuler yang ditargetkan) belum tentu diperlukan.

Pencitraan kedokteran nuklir jantung mengevaluasi jantung untuk penyakit arteri koroner dan kardiomiopati (penyakit otot jantung). Pencitraan ini juga dapat digunakan untuk membantu menentukan apakah jantung telah rusak akibat kemoterapi atau radioterapi. Kedokteran nuklir menggunakan sejumlah kecil bahan radioaktif yang disebut radiotracer yang biasanya disuntikkan ke dalam aliran darah, dihirup, atau ditelan. Radiotracer bergerak melalui area yang diperiksa dan mengeluarkan energi dalam bentuk

sinar gamma yang dideteksi oleh kamera khusus dan komputer untuk membuat gambar bagian dalam tubuh.

Pencitraan kedokteran nuklir memberikan informasi unik yang sering kali tidak dapat diperoleh menggunakan prosedur pencitraan lainnya. Oleh karena itu, masa depan pengobatan nuklir kardiovaskular akan dibentuk oleh teknik pencitraan baru yang terarah yang akan dirancang untuk memandu intervensi molekuler tertentu, tidak hanya berdasarkan biologi individu dari jaringan target kardiovaskular tetapi juga pada kondisi jaringan organ dan jaringan jarak jauh yang bersamaan. Panduan ini akan mengarah pada terapi presisi yang disesuaikan yang menghargai seluruh tubuh sebagai sistem jaringan, yang mengarah pada hasil kardiovaskular yang optimal yang diimbangi dengan bahaya minimal dan manfaat maksimal bagi organ lain.



**Gambar 39** Pencitraan radiasi nuklir pada organ

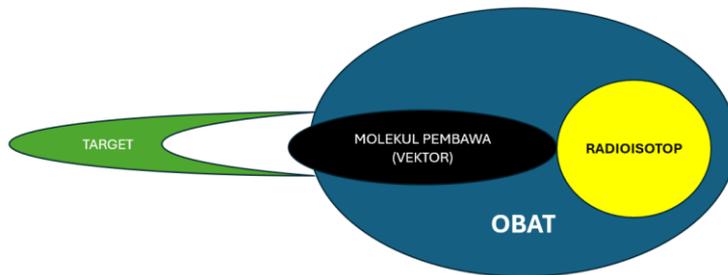
Pencitraan nuklir merupakan proses pemanfaatan radiasi nuklir baik secara langsung ataupun melalui tracer sehingga membantu dokter untuk melakukan analisis.

### 3.1.5 Radiofarmasi

Radiofarmasi telah berkembang secara dramatis menjadi bidang multidisiplin di mana ahli radiokimia bekerja dengan ahli biologi, fisikawan, matematikawan, insinyur, dan dokter dari berbagai disiplin ilmu. Radiofarmasi adalah obat yang mengandung, selain bahan-bahan lainnya, bentuk radioaktif dari unsur-unsur kimia yang disebut radioisotop.

Bergantung pada jenis radiasi yang dihasilkan oleh radioisotop tersebut, radiofarmasi dapat digunakan untuk mendiagnosis atau mengobati beberapa kondisi medis. Aplikasinya berkisar dari pencitraan berbagai organ, seperti otak, jantung, ginjal, dan tulang, hingga pengobatan kanker dan

hipertiroidisme. Radiofarmasi diberikan kepada pasien melalui suntikan, atau melalui mulut, dan dapat dipantau dan dianalisis dengan perangkat medis dan pengujian eksternal. Protokol keselamatan khusus diberlakukan di sebagian besar negara untuk melindungi pasien dan tenaga kesehatan dari efek samping obat-obatan ini.



**Gambar 40** Obat radiofarmasi

Selain mengandung unsur radioaktif, radiofarmasi mengandung molekul yang dirancang untuk bergerak di dalam tubuh pasien hingga mencapai jaringan atau organ target. Misalnya, radiofarmasi tertentu "mirip gula" – atom radioaktifnya merupakan bagian dari zat yang sangat mirip dengan gula, analog glukosa. Dikarenakan tumor mengonsumsi lebih banyak glukosa daripada bagian tubuh lainnya, obat yang mirip gula tersebut bergerak di dalam tubuh pasien dan diserap dalam jumlah besar oleh sel tumor yang akan "memakan gula" dan dengan demikian membuat tumor terlihat.

Tidak seperti pemeriksaan sinar-X yang dapat dilakukan kapan saja, pemeriksaan dengan radiofarmasi sering kali memerlukan waktu tunggu sejak obat diberikan hingga mencapai jaringan target.

Radiofarmasi diagnostik memancarkan radiasi yang disebut foton. Seperti sinar-X, bentuk cahaya khusus ini dapat menembus tubuh dan dideteksi oleh kamera eksternal yang akan menghasilkan gambar yang dapat digunakan untuk melihat tumor atau menilai fungsi paru-paru.

Radiofarmasi terapeutik mengandung antara lain atom radioaktif yang melepaskan jenis radiasi berenergi tinggi seperti partikel alfa atau beta dengan jangkauan pendek di jaringan yang menghancurkan atau melemahkan sel atau jaringan yang tidak diinginkan, seperti tumor atau sel tiroid yang terlalu aktif.

Proses diagnostik dan pengobatan memiliki kesamaan, tetapi pengobatan dengan radiofarmasi berfokus pada pemberian radiasi terarah ke sel-sel tertentu, mengabaikan langkah pencitraan yang menjadi inti penggunaan diagnostik. Meskipun radiofarmasi dirancang agar dapat bergerak di dalam tubuh tanpa merusak jaringan sehat, pasien mungkin perlu menjalani tes tambahan untuk memantau potensi efek samping dari terapi jenis ini, yang biasanya dianggap aman dan dapat ditoleransi dengan baik.

## **3.2 Pertanian**

### **3.2.1 Studi Nutrisi Tanaman**

Radioisotop digunakan sebagai alat penelitian untuk mengembangkan galur baru tanaman pertanian yang tahan kekeringan dan penyakit, memiliki kualitas yang lebih baik, memiliki waktu tumbuh yang lebih singkat, dan menghasilkan hasil panen yang lebih banyak.

Unsur radioaktif memancarkan berbagai energi radiasi dan partikel selama peluruhan. Energi ini digunakan dalam perawatan kesehatan, pertanian, dan ilmu fisika untuk penelitian dasar dan dalam berbagai aplikasi. Paparan radioaktif meningkatkan kualitas dan produktivitas produk pertanian beserta penanggulangan serangga, hama, dan penyakit.

Radioisotop membantu dalam studi pemanfaatan pupuk, insektisida, dan pestisida yang optimal pada tanaman budidaya tanpa efek berbahaya bagi tanaman dan organisme hidup lainnya. Radioisotop telah memainkan peran penting dalam meningkatkan produktivitas pertanian secara berkelanjutan (Singh, 2013). Radiasi pengion sangat berguna untuk pengawetan produk pertanian dan pangan. Banyak produk yang digunakan dalam kehidupan sehari-hari kita dalam beberapa hal memperoleh manfaat dari radiasi selama produksi.

Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA) mempromosikan penggunaan radioisotop dan sumber radiasi yang lebih luas dalam penelitian, industri, pertanian, dan kedokteran. Organisasi Pangan dan Pertanian (FAO) dan IAEA bekerja untuk memfasilitasi pengembangan dan adopsi teknologi nuklir di tingkat nasional dan internasional untuk meningkatkan produktivitas pertanian. Misi Divisi Gabungan FAO/IAEA adalah mengembangkan teknologi yang lebih baik untuk ketahanan pangan berkelanjutan yang

melibatkan metode nuklir. Radioisotop dan radiasi terkendali kini digunakan dalam berbagai penelitian seperti perbaikan tanaman, pengawetan makanan, penentuan sumber daya air tanah, sterilisasi persediaan medis, analisis hormon, jaringan pipa sinar-X, pengendalian proses industri, dan untuk mempelajari polusi lingkungan.

FAO dan IAEA bersama-sama mendukung dan mengoordinasikan proyek penelitian di seluruh dunia tentang penggunaan isotop dan radiasi di bidang irigasi dan produksi tanaman, kesuburan tanah, pengendalian serangga dan hama, produksi ternak, kesehatan, dan pengawetan makanan. Peningkatan pertanian merupakan salah satu kontribusi paling signifikan yang dapat diberikan oleh energi atom untuk memenuhi tantangan ketahanan pangan bagi generasi sekarang dan mendatang, untuk melestarikan sumber daya alam, dan untuk melindungi lingkungan.

Meskipun beberapa kemajuan dalam arah ini telah dibuat, potensi penuhnya belum dieksplorasi secara memadai. Radioisotop sangat berguna dalam memperkirakan jumlah fosfor dan nitrogen yang tersedia di dalam tanah. Estimasi ini membantu dalam menentukan jumlah pupuk fosfat dan nitrogen yang harus diberikan ke tanah (Broeshart, 1959). Pupuk yang diberi label dengan isotop radioaktif seperti  $^{32}\text{P}$  dan  $^{15}\text{N}$  telah digunakan untuk mempelajari penyerapan, retensi, dan pemanfaatan pupuk. Penggunaan pupuk yang berlebihan memengaruhi keanekaragaman hayati dan merusak lingkungan. Isotop-isotop ini menyediakan sarana untuk menentukan jumlah pupuk yang diambil dan hilang ke lingkungan oleh tanaman.  $^{15}\text{N}$  juga membantu dalam penilaian nitrogen yang difiksasi oleh tanaman dari atmosfer dalam kondisi lapangan. IAEA mengembangkan dan mentransfer teknik yang menggunakan isotop radioaktif untuk mengukur penyerapan nutrisi dari berbagai sumber pupuk dengan tujuan untuk mencapai hasil gabah yang lebih tinggi dan lebih stabil dengan mengoptimalkan penyerapan nutrisi dari pupuk yang diberikan. Hanya sedikit pupuk yang diberikan ke tanah yang diserap oleh tanaman. Sisanya tetap berada di dalam tanah atau hilang melalui beberapa proses. FAO dan IAEA telah bersama-sama melakukan beberapa program penelitian untuk penggunaan isotop radioaktif yang efisien untuk praktik pengelolaan pupuk pada tanaman pertanian penting seperti gandum, beras, dan jagung.

### 3.2.2 Pengendalian Hama Serangga

Hama serangga bertanggung jawab atas penurunan signifikan dalam produksi tanaman pertanian di seluruh dunia. Hama serangga merupakan ancaman serius bagi produktivitas pertanian. Hama tidak hanya mengurangi hasil panen tetapi juga menularkan penyakit ke tanaman budidaya.

Pestisida berlabel radioaktif digunakan untuk memantau persistensi residunya dalam bahan makanan, tanah, air tanah, dan lingkungan. Penelitian ini telah membantu melacak dan meminimalkan efek samping pestisida dan insektisida. Ada kekhawatiran bahwa penggunaan pestisida secara terus-menerus berdampak negatif pada lingkungan dan juga mengakibatkan perkembangan resistensi terhadap pestisida pada banyak spesies serangga. Selain itu, pestisida tidak hanya membunuh spesies target, tetapi juga banyak spesies hama bermanfaat lainnya yang bertanggung jawab untuk menjaga keseimbangan ekologi alami di lahan pertanian.

IAEA menggunakan ilmu nuklir untuk mengembangkan alternatif pengendalian hama yang ramah lingkungan. FAO dan divisi IAEA bersama-sama mensponsori proyek dan melakukan penelitian tentang pengendalian serangga menggunakan radiasi pengion. Mereka telah memberikan penekanan yang cukup besar pada Teknik Serangga Steril (SIT). Teknik ini bergantung pada penerapan radiasi pengion sebagai sarana untuk mensterilkan serangga jantan secara efektif tanpa mempengaruhi kemampuan mereka untuk berfungsi di lapangan dan berhasil kawin dengan serangga betina liar. Teknik ini melibatkan pelepasan sejumlah besar serangga jantan steril dari spesies target di tanaman pangan. Serangga jantan yang mandul bersaing dengan populasi jantan normal selama reproduksi seksual dan telur yang dihasilkan dari perkawinan mereka tidak subur sehingga tidak menghasilkan keturunan.

Ini adalah bentuk pengendalian kelahiran yang sangat spesifik yang mengurangi dan menghilangkan populasi serangga setelah dua atau tiga generasi. Ini telah digunakan secara efektif dalam pemberantasan lalat buah Mediterania dari AS, Meksiko, dan Chili serta infestasi cacing sekrep di AS dan Meksiko. Ini telah berhasil digunakan untuk membasmi beberapa hama serangga yang penting bagi pertanian di seluruh dunia.

### **3.2.3 Peningkatan Hasil Panen**

Pemuliaan tanaman memerlukan variasi genetik dari sifat-sifat yang berguna untuk perbaikan tanaman. Berbagai jenis radiasi dapat digunakan untuk menginduksi mutasi guna mengembangkan galur mutan yang diinginkan yang tahan terhadap penyakit, berkualitas lebih tinggi, memungkinkan pematangan lebih awal, dan menghasilkan hasil yang lebih tinggi.

Upaya awal untuk menginduksi mutasi pada tanaman ditunjukkan oleh Ilmuwan Amerika L.J. Stadler pada tahun 1930 menggunakan sinar-X. Kemudian, radiasi gamma dan neutron digunakan sebagai radiasi pengion. Teknik pemanfaatan energi radiasi untuk menginduksi mutasi pada tanaman ini telah banyak digunakan untuk memperoleh karakter yang diinginkan atau ditingkatkan pada sejumlah varietas tanaman. Teknik ini menawarkan kemungkinan untuk menginduksi karakter yang diinginkan yang tidak dapat ditemukan di alam atau telah hilang selama evolusi.

Pemilihan varietas mutan yang tepat dapat menghasilkan peningkatan kualitas dan produktivitas. Selama beberapa dekade terakhir, mutasi yang disebabkan oleh radiasi semakin berkontribusi pada peningkatan varietas tanaman pangan dan telah menjadi bagian yang mapan dari metode pemuliaan tanaman. Eksperimen mutasi yang disebabkan oleh radiasi menunjukkan hasil yang menjanjikan untuk peningkatan varietas tanaman pangan yang dibudidayakan di banyak negara. Beberapa Pusat Penelitian telah mengembangkan sejumlah varietas unggul tur, kacang hijau, kacang hitam, kacang tanah, rami, dan beras dengan menggunakan energi radiasi untuk menginduksi mutasi. Varietas tanaman pangan yang dikembangkan dengan menggunakan mutasi yang diinduksi telah ditemukan berharga oleh banyak otoritas nasional sehingga telah dirilis dan disetujui untuk produksi komersial. Ada banyak mutan serupa yang berhasil digunakan di negara lain, misalnya, jelai mutan dengan hasil tinggi yang dapat memanfaatkan dosis pupuk yang lebih tinggi untuk meningkatkan produksi biji-bijian.

### **3.2.3 Pengolahan dan Pengawetan Makanan**

Permintaan akan makanan instan yang sehat dan memiliki masa simpan yang lama terus meningkat baik di negara maju maupun negara berkembang. Sebanyak 25-30% dari hasil produksi pangan dunia hilang karena

pembusukan oleh mikroba dan hama, dan kerugian ini lebih banyak terjadi di negara berkembang.

Kehilangan pangan ini dapat dihindari dengan menggunakan metode pengawetan pangan yang efisien. Radiasi dapat digunakan untuk menghancurkan mikroba dalam pangan dan mengendalikan serangan serangga dan parasit pada pangan yang dipanen untuk mencegah berbagai jenis pemborosan dan pembusukan. Perpanjangan masa simpan pangan tertentu selama beberapa hari dengan iradiasi sudah cukup untuk mencegahnya dari pembusukan. Iradiasi pangan berpotensi menghasilkan pangan yang aman dengan masa simpan yang lama. Benih dan makanan kaleng tertentu dapat disimpan dalam jangka waktu yang lebih lama dengan memaparkannya secara perlahan ke radiasi.

Iradiasi pangan menghemat energi jika dibandingkan dengan metode pengawetan pangan konvensional untuk memperoleh masa simpan yang sama. Iradiasi pangan dapat mengatasi kekurangan pangan dunia dengan mengurangi kehilangan pascapanen. Iradiasi makanan dapat menggantikan atau secara drastis mengurangi penggunaan bahan tambahan dan fumigan makanan yang berbahaya bagi konsumen maupun pekerja di industri pengolahan makanan.

Iradiasi tidak memanaskan bahan makanan sehingga makanan tetap segar dalam keadaan fisiknya. Agen penyebab pembusukan (mikroba, serangga, dll.) dihilangkan dengan iradiasi dari makanan yang dikemas dan bahan kemasan kedap terhadap bakteri dan serangga sehingga kontaminasi ulang tidak terjadi. Iradiasi makanan membunuh serangga dan parasit, menonaktifkan spora bakteri dan jamur, mencegah reproduksi mikroba dan serangga, menghambat perkecambahan tanaman akar, menunda pematangan buah, dan meningkatkan sifat teknologi makanan (Kraybill, 1960).

FDA telah menyetujui iradiasi sebagai metode untuk menghambat perkecambahan dan menunda pematangan pada banyak buah dan sayuran segar. Beberapa langkah telah diambil oleh divisi FAO dan IAEA dalam kerja sama erat dengan Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) untuk mempromosikan penerimaan internasional terhadap makanan yang diiradiasi (WHO, 1988). Komite Ahli Gabungan FAO/IAEA/WHO tentang Keutuhan Makanan yang Diradiasi (1980) telah mengevaluasi keamanan makanan yang diradiasi untuk

konsumsi manusia dan menyimpulkan bahwa iradiasi makanan apa pun hingga dosis rata-rata 10 kGy tidak menimbulkan bahaya toksikologi. Pengenalan iradiasi makanan di seluruh dunia diperlukan untuk meningkatkan kepercayaan di antara negara-negara perdagangan bahwa makanan yang diradiasi di satu negara dan ditawarkan untuk dijual di negara lain, telah menjalani standar keutuhan, praktik higienis, dan pengendalian perlakuan iradiasi yang dapat diterima secara umum. Upaya dan dukungan dari organisasi internasional, pemerintah, dan industri makanan akan diperlukan untuk pengenalan iradiasi makanan pada skala komersial yang sesungguhnya. Beberapa organisasi dan industri tidak mengenali metode pengawetan makanan yang murah dan efisien ini. Banyak negara telah memberikan izin untuk iradiasi gamma pada bahan makanan.

### **3.3 Radiografi Industri**

Radiografi industri adalah metode pemeriksaan material untuk melihat cacat tersembunyi dengan menggunakan kemampuan sinar-X pendek, sinar gamma, dan neutron untuk menembus berbagai material.

#### **3.3.1 Pengujian Nondestruktif**

Radiografi industri untuk pengujian nondestruktif digunakan untuk memeriksa, antara lain, beton dan berbagai macam las, seperti yang terdapat pada pipa gas dan air, tangki penyimpanan, dan elemen struktural. Radiografi ini dapat mengidentifikasi retakan atau cacat yang mungkin tidak terlihat. Karakteristik ini menjadikan pengujian nondestruktif sebagai alat utama untuk pengendalian mutu, keselamatan, dan keandalan.

IAEA mempromosikan penggunaan teknologi pengujian nondestruktif untuk mempertahankan standar pengendalian mutu yang ketat demi pengoperasian instalasi nuklir dan instalasi industri lainnya yang aman. IAEA membantu negara-negara anggotanya melatih staf dalam menerapkan teknologi tersebut dan menyediakan peralatan yang diperlukan. Keterlibatan jangka panjang Badan ini dalam program ini telah menghasilkan pembentukan tim nasional yang menyediakan layanan bagi industri, pusat pelatihan, dan badan sertifikasi yang bertanggung jawab atas pelatihan dan sertifikasi personel yang terlibat dalam pengujian nondestruktif. Di banyak lembaga, upaya ini telah menghasilkan kondisi swasembada di bidang

teknologi ini. Untuk memandu para ahli IAEA yang terlibat dalam program pelatihan, dan untuk mencapai tingkat keseragaman dan harmonisasi internasional dalam materi pelatihan dan kompetensi personel, Badan tersebut juga telah menerbitkan berbagai pedoman pelatihan dan publikasi terkait.

Dalam Pengujian Radiografi, komponen uji ditempatkan di antara sumber radiasi dan film (atau detektor). Perbedaan kepadatan dan ketebalan material pada komponen uji akan melemahkan (yaitu mengurangi) radiasi tembus melalui proses interaksi yang melibatkan hamburan dan/atau penyerapan. Perbedaan penyerapan kemudian direkam pada film atau melalui sarana elektronik.

Dalam radiografi industri, terdapat beberapa metode pencitraan yang tersedia, teknik untuk menampilkan gambar akhir, yaitu Radiografi Film, Radiografi Waktu Nyata (RTR), Tomografi Terkomputasi (CT), Radiografi Digital (DR), dan Radiografi Terkomputasi (CR).

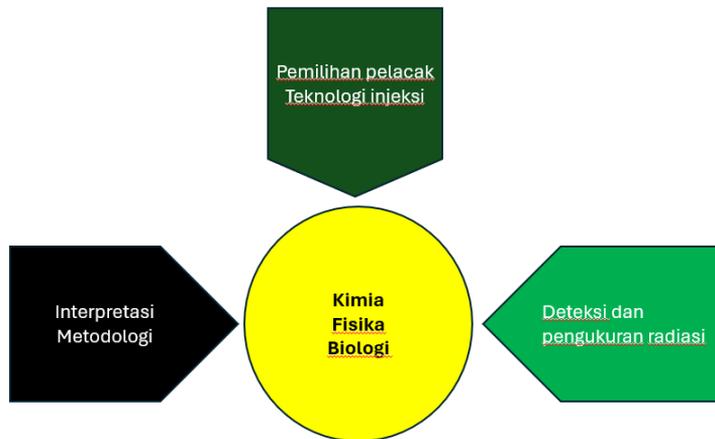
Terdapat dua sumber radioaktif berbeda yang tersedia untuk penggunaan industri, Sinar-X, dan Sinar Gamma. Sumber radiasi ini menggunakan tingkat energi yang lebih tinggi, yaitu panjang gelombang yang lebih pendek, versi gelombang elektromagnetik.

Dikarenakan radioaktivitas yang terlibat dalam pengujian radiografi, sangat penting untuk memastikan bahwa Aturan Lokal dipatuhi secara ketat selama pengoperasian. Tomografi Terkomputasi (CT) adalah salah satu metode NDT canggih berbasis laboratorium yang ditawarkan TWI kepada industri. CT adalah teknik berbasis radiografi yang menyediakan gambar penampang dan volume 3D dari objek yang diperiksa. Gambar-gambar ini memungkinkan struktur internal objek uji diperiksa tanpa superimposisi bawaan yang terkait dengan radiografi 2D. Fitur ini memungkinkan analisis terperinci dari struktur internal berbagai komponen.

### **3.3.2 Pelacak Radioaktif**

Pelacak radioaktif pertama kali diterapkan untuk pemecahan masalah industri sekitar pertengahan abad lalu. Sejak saat itu penggunaannya terus meningkat sehingga teknik pelacak radioaktif digunakan secara luas di

seluruh dunia untuk pemecahan masalah dan pengoptimalan proses dalam industri.



**Gambar 41** Metodologi pelacak radioaktif dan aspek-aspek yang saling terkait

Satu hal yang sangat penting dalam metodologi pelacak menyangkut apa yang sebenarnya diukur oleh detektor. Detektor sebenarnya tidak melakukan pengukuran lokal, tetapi mengumpulkan sejumlah informasi dalam sudut tertentu. Pemilihan pelacak radioaktif yang sesuai merupakan hal yang sangat penting untuk eksperimen pelacak radioaktif. Pelacak radioaktif harus mewakili aliran yang dilacak. Sering kali, pelacak radioaktif yang representatif dapat dipilih berdasarkan pengalaman, dari referensi yang dipublikasikan, atau dari evaluasi fisik dan kimia tentang kompatibilitasnya dengan aliran yang akan dilacak.

Dalam keadaan tertentu, pelacak harus identik secara kimia dengan zat yang dilacak. Hal ini berlaku saat mempelajari, misalnya, reaksi kimia, kinetika, kelarutan, tekanan uap, dan proses yang didominasi oleh difusi atom atau molekul. Isotop radioaktif dari unsur yang dilacak dan molekul berlabel dapat digunakan sebagai pelacak, misalnya:  $\text{H}_3\text{HO}$  (atau HTO) untuk air,  $^{24}\text{NaOH}$  untuk NaOH, dan  $^{14}\text{CO}_2$  untuk  $\text{CO}_2$ . Pelacak ini disebut pelacak radioaktif kimia, pelacak intrinsik, atau pelacak internal.

Penggunaan pelacak intrinsik tentu saja lebih baik, tetapi sayangnya tidak selalu memungkinkan. Untuk mengambil contoh  $\text{CO}_2$  lagi, baik karbon maupun oksigen tidak memiliki isotop pemancar gamma yang berumur cukup panjang (misalnya,  $^{10}\text{C}$  dan  $^{15}\text{C}$  adalah pemancar gamma, tetapi waktu

paruhnya masing-masing adalah 19,1 dan 2,3 detik). Hal ini berarti bahwa pelacak intrinsik  $\text{CO}_2$  harus menjadi penghasil beta, seperti  $^{14}\text{CO}_2$  yang disebutkan di atas, dan bahwa pengukuran melalui dinding tidak akan memungkinkan, yang merupakan kendala yang tidak dapat diterima dalam banyak kasus. Jumlah radiotracer yang dibutuhkan untuk aplikasi tertentu bergantung pada Waktu paruh pelacak radioaktif yang digunakan, dan tingkat radiasi latar belakang.

### 3.3.3 Modifikasi Material

Teknologi radiasi dapat digunakan untuk memodifikasi berbagai material. Hal ini menyebabkan perubahan tertentu pada sifat-sifatnya, yang banyak di antaranya dapat digunakan dalam berbagai aplikasi komersial. Berbagai sumber radiasi digunakan untuk memodifikasi material, seperti sumber radioisotop berintensitas tinggi, akselerator elektron dengan berbagai energi, dan sinar-X yang berasal darinya. Radiasi juga digunakan untuk pencangkakan dan modifikasi sebagian material. Aplikasi komersial utama dari teknologi ini adalah pengikatan silang rantai polimer, yang digunakan misalnya dalam memproduksi isolasi kawat dan kabel, ban mobil atau lateks karet alam untuk barang-barang medis, seperti sarung tangan. Metode suhu ruangan ini mampu mengikat silang produk jadi, mencapai sifat material yang unggul, dan membantu menghilangkan residu kimia beracun.

Aplikasi komersial lainnya di seluruh dunia adalah tabung yang dapat menyusut karena panas, pembungkus makanan, dan pemanas yang mengatur sendiri. Polimer yang larut dalam air yang terikat silang, juga dikenal sebagai hidrogel, dikomersialkan untuk pembalut luka, khususnya untuk luka bakar dan ulkus diabetes. Aplikasi hidrogel yang muncul meliputi penyerap super untuk perawatan kesehatan dan aplikasi pertanian, pemurnian air limbah dan imobilisasi enzim. Degradasi polimer yang terkendali melalui radiasi, juga disebut pemotongan rantai, digunakan untuk meningkatkan sifat serta kompatibilitas dan parameter pemrosesan polimer alami dan sintetis.

Aplikasi komersial terbesar lain dari teknologi ini adalah degradasi politetrafluoroetilena (PTFE) melalui penyinaran di udara, yang menghasilkan bubuk mikro dengan berat molekul lebih rendah dengan kompatibilitas yang lebih baik dengan bahan lain yang kemudian dapat digunakan sebagai aditif untuk tinta dan pelapis.

Pencangkakan radiasi digunakan ketika diperlukan sifat massal dan permukaan bahan yang berbeda. Produk komersial meliputi pemisah baterai, serat yang dicangkok dengan daya warna yang ditingkatkan, penyerapan dan konsentrasi ion berharga, penghilangan ion beracun serta pemurnian dan penyaringan, produk dengan permukaan yang biokompatibel dan tidak mengotori, dan permukaan kultur sel untuk rekayasa lembaran sel. Penggunaan lain dari teknik radiasi adalah pola permukaan, di mana hanya bagian tertentu dari permukaan atau bahan yang dimodifikasi, baik dengan ikatan silang yang diinduksi, pemotongan rantai, atau pencangkakan. Aplikasi komersial dari proses tersebut adalah litografi sinar-X, berkas elektron, dan berkas ion yang diterapkan pada sirkuit mikroelektronik chip komputer.

### **3.3.4 Pengukuran Nukleonik**

Pengukur nukleonik adalah instrumen pengukuran dan analisis yang memanfaatkan interaksi antara radiasi pengion dan materi. Industri di seluruh dunia menggunakan teknologi ini untuk mengendalikan dan meningkatkan kualitas produk dengan mengoptimalkan proses dan menghemat energi serta material.

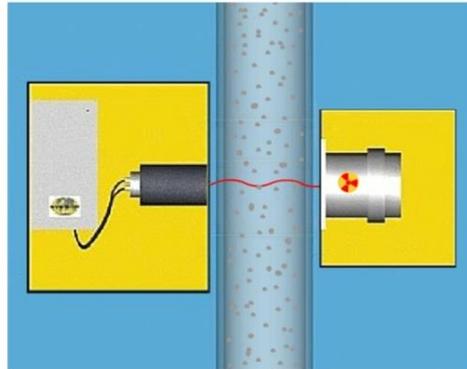
Ratusan ribu sistem kontrol nukleonik beroperasi di industri di seluruh dunia. Dikarenakan teknologi ini memiliki keunggulan utama, yaitu tidak memerlukan kontak langsung dengan material, instrumen ini sangat cocok untuk digunakan pada jalur produksi berkecepatan tinggi atau sistem yang beroperasi pada suhu ekstrem. Sistem kontrol nukleonik dapat digunakan untuk aplikasi pengukuran statis maupun berkelanjutan. Beberapa pengukur nukleonik tidak menggunakan sumber radiasi tetapi didasarkan pada pengukuran radiasi alami material yang diperiksa.

Sistem pengukuran nukleonik juga memungkinkan visualisasi struktur internal objek dan mengalir melalui berbagai teknologi seperti Computed Tomography (CT). Dua sistem pengukur yang paling umum digunakan adalah transmisi dan hamburan balik. Sistem ini mengukur material tanpa merusaknya atau mengubah sifatnya.

Radiasi gamma berenergi tinggi dapat menembus dinding wadah tertutup, yang memungkinkan material di dalamnya diukur tanpa membuka wadah. Sebagian besar sistem kendali nukleonik memiliki volume pengambilan

sampel yang lebih besar daripada teknik fisika lainnya, yang biasanya juga jauh lebih besar daripada pengujian (teknik pengambilan sampel analitis) yang biasanya dikumpulkan untuk analisis laboratorium. Sistem ini tangguh dan biasanya serbaguna dalam penerapannya pada berbagai bahan dan proses.

Teknologi sistem kendali nukleonik bersaing ketat dengan teknik konvensional di banyak bidang. Ini mencakup sektor-sektor industri prioritas internasional seperti pertambangan dan pemrosesan bijih mineral, pemantauan lingkungan, industri kertas dan plastik, industri semen dan teknik sipil, serta industri minyak dan gas. Karena manfaat di sektor-sektor ini cukup besar, aplikasi dan teknik baru yang digunakan dalam desain, kalibrasi, kontrol kualitas, dan pengoperasian teknologi ini terus berlanjut.



**Gambar 42** SysKon 50 (diambil dari World Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.9 No.2, April 2019)

SysKOn 50 merupakan contoh alat yang menggunakan pengukur nukleonik, Alat tersebut merupakan perangkat kontrol yang memungkinkan pengukuran *on-line* dari kepadatan cairan yang diangkut dalam pipa. Prinsip pengukuran didasarkan pada penentuan penyerapan radiasi gamma berenergi tinggi oleh material yang diteliti. Alat pengukur dipasang langsung pada bagian pipa yang menaik, yang menjamin bahwa penampang pipa terisi dengan material yang diuji.

### 3.3.5 Energi

Energi nuklir adalah bentuk energi yang dilepaskan dari nukleus atau inti atom, yang terdiri dari proton dan neutron. Sumber energi ini dapat

diproduksi dengan dua cara, yaitu fisi ketika inti atom terpecah menjadi beberapa bagian, energi dari radiasi nuklir atau fusi ketika inti menyatu.

### **3.3.5.1 Reaktor Nuklir Daya**

Energi nuklir yang dimanfaatkan di seluruh dunia saat ini untuk menghasilkan listrik adalah melalui fisi nuklir, sedangkan teknologi untuk menghasilkan listrik dari fusi masih dalam tahap penelitian dan pengembangan. Energi nuklir dapat digunakan untuk menghasilkan listrik, tetapi harus dilepaskan terlebih dahulu dari atom. Dalam proses fisi nuklir, atom dipecah untuk melepaskan energi tersebut. Reaktor nuklir, atau pembangkit listrik, adalah serangkaian mesin yang dapat mengendalikan fisi nuklir untuk menghasilkan listrik.

Bahan bakar yang digunakan reaktor nuklir untuk menghasilkan fisi nuklir adalah pelet unsur uranium. Dalam reaktor nuklir, atom-atom uranium dipaksa untuk terpecah. Saat terpecah, atom-atom tersebut melepaskan partikel-partikel kecil yang disebut produk fisi. Produk fisi menyebabkan atom-atom uranium lainnya terpecah, yang memulai reaksi berantai. Energi yang dilepaskan dari reaksi berantai ini menghasilkan panas. Panas yang dihasilkan oleh fisi nuklir menghangatkan zat pendingin reaktor. Zat pendingin biasanya berupa air, tetapi beberapa reaktor nuklir menggunakan logam cair atau garam cair. Zat pendingin yang dipanaskan oleh fisi nuklir menghasilkan uap. Uap tersebut memutar turbin, atau roda yang diputar oleh arus yang mengalir. Turbin menggerakkan generator, atau mesin yang menghasilkan listrik. Batang-batang bahan yang disebut racun nuklir dapat mengatur seberapa banyak listrik yang dihasilkan. Racun nuklir adalah bahan-bahan, seperti jenis unsur xenon, yang menyerap sebagian produk fisi yang dihasilkan oleh fisi nuklir. Semakin banyak batang racun nuklir yang ada selama reaksi berantai, reaksi akan semakin lambat dan terkendali. Menghilangkan batang-batang tersebut akan memungkinkan reaksi berantai yang lebih kuat dan menghasilkan lebih banyak listrik.

Pada tahun 2011, sekitar 15 persen listrik dunia dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga nuklir. Amerika Serikat memiliki lebih dari 100 reaktor, meskipun sebagian besar listriknya dihasilkan dari bahan bakar fosil dan energi hidroelektrik.

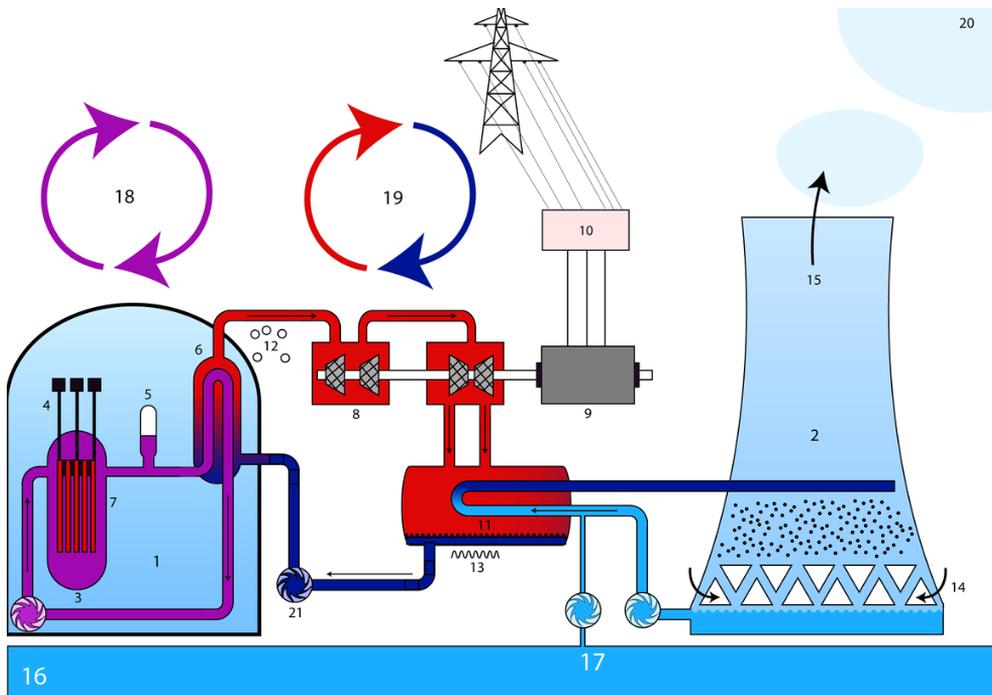
Uranium merupakan bahan bakar yang paling banyak digunakan untuk menghasilkan energi nuklir. Hal ini dikarenakan atom-atom uranium terbelah dengan relatif mudah. Uranium juga merupakan unsur yang sangat umum, ditemukan di bebatuan di seluruh dunia. Akan tetapi, jenis uranium tertentu yang digunakan untuk menghasilkan energi nuklir yang disebut  $^{235}\text{U}$  tergolong langka.  $^{235}\text{U}$  hanya berjumlah kurang dari satu persen dari uranium di dunia.

Meskipun sebagian uranium yang digunakan Amerika Serikat ditambang di negara ini, sebagian besar diimpor. AS memperoleh uranium dari Australia, Kanada, Kazakhstan, Rusia, dan Uzbekistan. Setelah uranium ditambang, uranium tersebut harus diekstraksi dari mineral lain. Uranium juga harus diproses sebelum dapat digunakan. Reaktor nuklir pada umumnya menggunakan sekitar 200 ton uranium setiap tahun. Proses yang rumit memungkinkan sejumlah uranium dan plutonium untuk diperkaya kembali atau didaur ulang. Hal ini mengurangi jumlah penambangan, ekstraksi, dan pemrosesan yang perlu dilakukan.

Reaktor nuklir pertama yang menghasilkan listrik terletak di dekat Arco, Idaho. Reaktor Breeder Eksperimental mulai beroperasi pada tahun 1951. Pembangkit listrik tenaga nuklir pertama yang dirancang untuk menyediakan energi bagi masyarakat didirikan di Obninsk, Rusia, pada tahun 1954.

Membangun reaktor nuklir memerlukan teknologi tingkat tinggi, dan hanya negara-negara yang telah menandatangani Perjanjian Non-Proliferasi Nuklir yang dapat memperoleh uranium atau plutonium yang dibutuhkan. Karena alasan ini, sebagian besar pembangkit listrik tenaga nuklir berlokasi di negara-negara maju. Terdapat cukup banyak jenis dan tipe reaktor nuklir daya, berikut ini sebagian dari tipe reaktor yang dimaksud. Reaktor Air Ringan (menggunakan air biasa sebagai pendingin dan moderator neutron):

Reaktor ini sesuai dengan disainnya dinamakan reaktor PWR (Reaktor Air bertekanan).

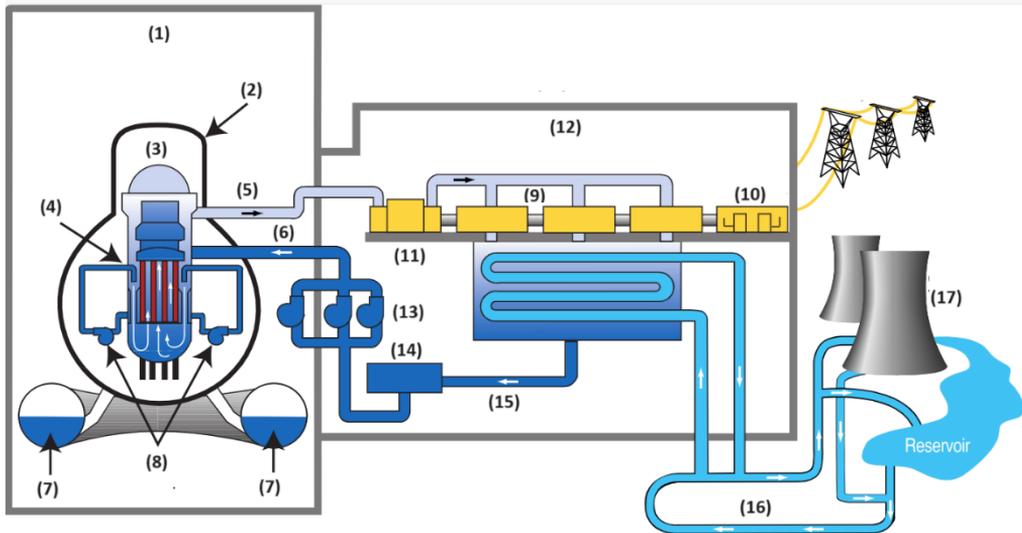


**Gambar 43** Skema atau diagram PWR (diambil dari wikipedia)

PWR ini terdiri atas: (1) blok reaktor, (2) menara pendingin, (3) reaktor, (4) batang kendali, (5) penyangga tekanan, (6) generator uap, (7) elemen bahan bakar, (8) turbin, (9) generator, (10) transformator, (11) kondensor, (12) gas, (13) cairan, (14) udara, (15) udara (lembab), (16) sungai, (17) sirkulasi air pendingin, (18) sirkuit primer, (19) sirkuit sekunder, (20) uap air, dan (21) pompa.

Air di dalam inti dipanaskan oleh fisi nuklir dan kemudian dipompa ke dalam tabung di dalam penukar panas. Tabung-tabung tersebut memanaskan sumber air terpisah agar menghasilkan uap. Uap tersebut kemudian memutar generator listrik hingga menghasilkan listrik. Air inti kembali ke reaktor untuk dipanaskan kembali dan proses ini diulang.

Selain PWR, ada lagi desain reaktor yang Bernama BWR (reaktor air mendidih).

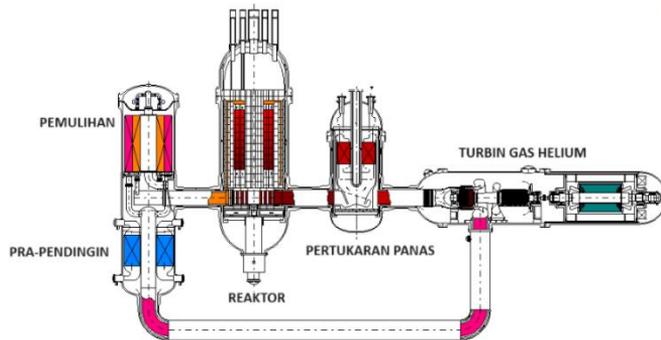


**Gambar 44** Diagram atau skema BWR (dari wikipedia)

BWR terdiri atas: (1) bangunan reaktor, (2) penampung primer, (3) bejana reaktor, (4) core reaktor, (5) aliran uap, (6) aliran air, (7) torus, (8) pompa resirkulasi, (9) turbin, (10) generator, (11) kondenser, (12) bangunan turbin, (13) pompa air umpan, (14) filter, (15) kondensat air, (16) air pendingin, dan (17) menara pendingin.

BWR memanaskan air dan menghasilkan uap langsung di dalam bejana reaktor. Air dipompa ke atas melalui inti reaktor dan dipanaskan melalui fisi. Pipa kemudian menyalurkan uap langsung ke turbin untuk menghasilkan listrik. Uap yang tidak terpakai kemudian dikondensasikan kembali menjadi air dan digunakan kembali dalam proses pemanasan.

Selain reaktor air ringan terdapat pula reaktor tipe lain seperti HTGR, Reaktor berpendingin gas suhu tinggi.



**Gambar 45** Diagram atau skema HTGR (dari wikipedia)

HTGR adalah reaktor nuklir yang menggunakan gas helium sebagai pendinginnya, bahan keramik, terutama grafit, sebagai struktur intinya, dan mampu memasok panas nuklir ke luar. Dikarenakan reaktor air ringan menggunakan tabung pelapis logam sebagai bahan bakarnya dan air ringan sebagai pendinginnya, suhu keluaran dibatasi sekitar 300 derajat C. Efisiensi pembangkitan dayanya hanya 30% menggunakan turbin uap. Di sisi lain, HTGR dapat menghasilkan panas suhu tinggi sekitar 1000 derajat C menggunakan bahan keramik yang menawarkan ketahanan terhadap suhu tinggi dan menerapkan sistem turbin gas yang dapat mencapai efisiensi pembangkitan daya tinggi lebih dari 45%.

Panas yang dihasilkannya juga dapat diterapkan ke berbagai bidang industri. Bahan bakar HTGR memiliki lapisan keramik empat kali lipat dan membatasi produk fisi bahkan pada suhu 1600 derajat C. Karena struktur intinya sebagian besar terdiri dari grafit yang memiliki kapasitas panas yang sangat besar, variasi suhu inti sangat lambat selama kecelakaan abnormal. Bahkan saat terjadi kehilangan gas helium pendingin yang dipicu oleh peristiwa pecahnya pipa, panas yang dihasilkan oleh inti reaktor akan dihilangkan melalui pembuangan panas dari bejana tekan reaktor sehingga bahan bakar tidak akan rusak. Ini berarti bahwa HTGR memiliki tingkat keamanan yang signifikan yang tidak perlu dikhawatirkan akan terjadinya pelelehan inti atau kecelakaan pelepasan radioaktivitas.

### 3.3.5.3 Baterai Nuklir

Baterai nuklir adalah perangkat yang memanfaatkan energi dari peluruhan isotop unsur radioaktif untuk menghasilkan listrik. Baterai nuklir, baterai atom, dan generator radioisotop adalah istilah yang dapat dipertukarkan yang menunjukkan bagaimana sumber daya menciptakan arus. Baterai nuklir berbeda dari baterai tradisional dalam hal biaya, masa pakai, aplikasi, dan fungsi. Baterai tradisional menggunakan reaksi elektrokimia sebagai sumber dayanya. Generator radioisotop memanfaatkan peluruhan partikel alfa, beta, dan gamma radioaktif untuk menyediakan sumber energi yang konstan. Saat partikel-partikel ini dipancarkan, mereka mengaduk elektron dalam sistem baterai untuk menciptakan arus.

Dikarenakan peningkatan kemampuan baterai nuklir, harganya jauh lebih mahal daripada baterai tradisional dengan ukuran yang sama. Ini adalah salah satu keterbatasan yang saat ini ada dalam penelitian dan penggunaan baterai nuklir.

Baterai atom dan nuklir menghasilkan listrik melalui peluruhan partikel radioaktif. Beberapa baterai menggunakan peluruhan ini untuk menghasilkan panas dan kemudian memanfaatkannya dengan termokopel, yang lain memanfaatkan sambungan dioda untuk memfasilitasi konversi non-termal. Terlepas dari metodenya, semua baterai nuklir mengambil energi dari sumber radioaktif. Baterai atom yang berbeda menggunakan sistem yang berbeda untuk menghasilkan daya bagi perangkatnya. Setiap jenis memiliki manfaat, keterbatasan, dan kasus penggunaan sendiri. Terdapat beberapa jenis baterai nuklir.

Baterai Konversi Termal, sesuai namanya, baterai konversi termal menggunakan partikel yang dipancarkan dari peluruhan radioaktif untuk menghasilkan panas, yang kemudian diubah menjadi listrik. Baterai ini mencapai suhu internal yang sangat tinggi dan mengubah sebagian panas tersebut menjadi listrik.

Salah satu jenis baterai konversi termal adalah generator termoelektrik radioisotop yang mana menggunakan termokopel untuk menciptakan energi dari perbedaan suhu antara sisi dingin perangkat dan sumber daya radioisotop, atau sisi panas. Baterai konversi non-termal, termasuk sumber daya betavoltaik, menggunakan energi insiden yang dilepaskan selama proses peluruhan radioaktif untuk mendaur ulang elektron menjadi arus listrik.

Dengan mengubah sebagian kecil energi nuklir yang dihasilkan selama proses peluruhan, baterai ini dapat menghasilkan aliran listrik tanpa bergantung pada perbedaan suhu.

Baterai Berlian Nuklir: Salah satu bidang teknologi baterai atom yang paling menarik adalah penelitian yang sedang berlangsung untuk meningkatkan bidang tersebut. Para ilmuwan saat ini tengah berupaya mengembangkan baterai berlian nuklir yang menghasilkan daya dari peluruhan radioaktif berlian (karbon-14).

Baterai berlian ini, seperti semua baterai nuklir, menghasilkan daya yang sebanding dengan waktu paruh sumber radioaktif. Perbedaannya adalah karbon-14 memiliki waktu paruh 5.700 tahun. Baterai berlian ini masih jauh dari kata sempurna, tetapi tritium betavoltaic yang menawarkan manfaat serupa sudah digunakan.

Baterai ini menunjukkan peluang luar biasa untuk menggunakan kembali limbah nuklir yang ada sambil menawarkan aliran listrik yang stabil dan berjangka panjang. Betavoltaik konversi langsung adalah salah satu baterai nuklir paling efisien di pasaran karena peluruhan partikel beta diubah lebih efektif menjadi daya listrik yang dapat digunakan daripada partikel lainnya.

Betavoltaik konversi tidak langsung adalah betavoltaik yang menggunakan emisi cahaya dan sel fotovoltaik (bukan sel betavoltaik) untuk menghasilkan arus listrik. Jenis perangkat ini kurang efisien daripada perangkat konversi langsung selain itu batere ini tidak bertahan lama karena degradasi fosfor pemancar cahaya, tetapi dapat mencapai daya tinggi untuk jangka waktu yang singkat. Jenis baterai nuklir yang digunakan sering kali bergantung pada isotop radioaktif mana yang bertindak sebagai sumber daya. Ada perbedaan antara cara energi dari partikel alfa, partikel beta, dan sinar gamma ditangkap.

Berikut ini adalah beberapa isotop radioaktif yang paling umum digunakan dan diuji. Uranium merupakan unsur nuklir radioaktif yang populer untuk pasokan listrik karena telah digunakan sebagai sumber energi utama di pembangkit listrik tenaga nuklir selama lebih dari 60 tahun. Sebagian besar pembangkit menggunakan isotop uranium-235 karena atom-atomnya lebih mudah dipecah. Uranium dapat ditambang dalam bentuk padat dan dianggap radioaktif lemah. Uranium menghasilkan partikel alfa

lemah yang tidak dapat menembus selebar kertas, dan waktu paruh uranium-235 adalah sekitar 700 juta tahun. Sayangnya, uranium-235 tidak cocok untuk digunakan dalam baterai.

Sejauh menyangkut perangkat jarak jauh kecil, isotop ini tidak mungkin digunakan. Salah satu unsur radioaktif lain yang lebih dikenal plutonium telah digunakan dalam baterai nuklir di masa lalu. Isotop plutonium-238 memiliki waktu paruh 87,7 tahun dan berfungsi sebagai sumber daya alat pacu jantung untuk waktu yang singkat pada tahun 1970-an. Ada dua masalah utama dengan baterai plutonium-238. Pertama, baterai ini lebih besar daripada baterai lainnya. Penghalang yang diperlukan untuk memperlambat radiasi plutonium membuat alat pacu jantung ini tidak nyaman dan tidak menyenangkan bagi mereka yang memilikinya. Kedua, dalam skenario terburuk, alat ini masih sangat beracun bagi manusia. Jika sebagian kecil cairan dalam baterai bersentuhan dengan aliran darah seseorang, kemungkinan besar mereka akan meninggal karena penyakit radiasi.

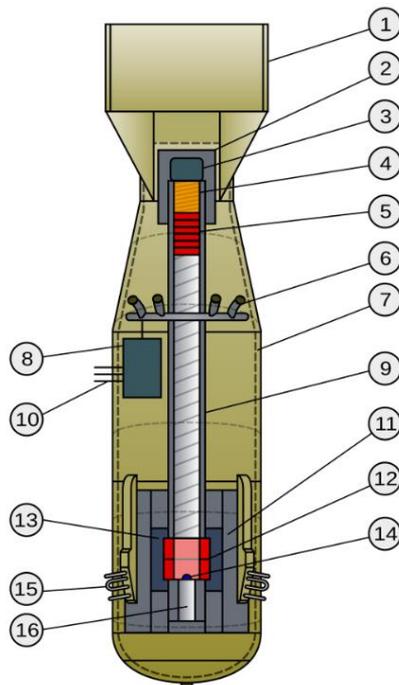
### **3.3.5.3 Senjata Nuklir**

Senjata nuklir yang pertama kali meledak adalah bom nuklir yang diledakan pada 16 Juli 1945 di New Mexico, ledakan tersebut merupakan uji coba bom nuklir pertama. Beberapa saat kemudian dunia mengalami perubahan yang sangat signifikan, yaitu ketika pada tanggal 6 Agustus 1945, Amerika Serikat menjatuhkan bom atom di kota Hiroshima, Jepang. Bom tersebut menewaskan atau melukai hampir 130.000 orang. Tiga hari kemudian, Amerika Serikat menjatuhkan bom yang kedua di Nagasaki, dari 286.000 orang yang tinggal di sana pada saat ledakan, 74.000 orang tewas dan 75.000 lainnya mengalami luka parah. Akibat dua bom nuklir ini Jepang setuju untuk menyerah tanpa syarat pada 14 Agustus 1945, peristiwa yang mengakibatkan berakhirnya Perang Dunia II.

Setelah peristiwa ini pada tahun-tahun berikutnya, Amerika Serikat, Uni Soviet, dan Inggris Raya melakukan beberapa uji coba senjata nuklir. Penolakan terhadap senjata nuklir yang pertama dilakukan pada 1954, yaitu ketika presiden Jawaharlal Nehru dari India menyerukan larangan uji coba nuklir. Pada tahun 1958, hampir 10.000 ilmuwan menyampaikan petisi kepada Sekretaris Jenderal Perserikatan Bangsa-Bangsa Dag Hammarskjold yang berisi permintaan, “Kami menganggap sangat penting untuk segera mengambil tindakan guna memberlakukan perjanjian internasional guna

menghentikan pengujian semua senjata nuklir.” Meskipun telah terjadi penolakan besar-besaran, Prancis tetap meledakkan perangkat nuklir pertamanya pada tahun 1960 diikuti oleh Tiongkok pada bulan Oktober 1964 saat melakukan uji coba pertamanya.

Semua senjata nuklir menggunakan fisi untuk menghasilkan ledakan. “Little Boy” senjata nuklir pertama yang pernah digunakan selama masa perang bekerja dengan menembakkan silinder uranium-235 berongga ke “sumbat” target yang terbuat dari bahan yang sama. Setiap bagiannya sendiri tidak cukup untuk membentuk massa kritis (jumlah kritis adalah jumlah minimum bahan nuklir yang dibutuhkan untuk mempertahankan fisi), tetapi dengan menabrakkan bagian-bagiannya massa kritis tercapai dan reaksi berantai fisi pun terjadi.

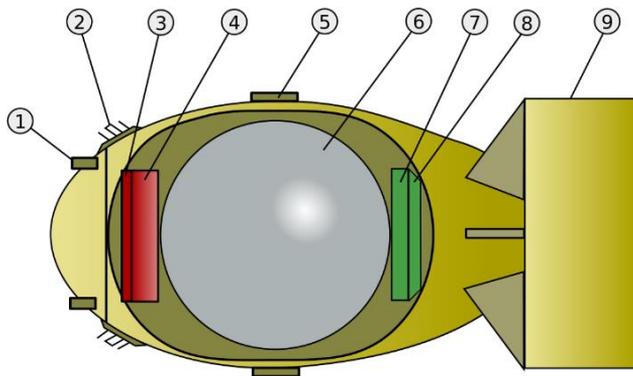


**Gambar 46** Skema sederhana Little Boy (dari wikipedia)

(1) Sirip ekor kotak, (2) Rakitan sungsang senjata baja, (3) Detonator, (4) Peledak cordite (konvensional), (5) "Proyektil" uranium-235, enam cincin (26 kg) dalam kaleng baja tipis, (6) Port penginderaan Baro dan manifold, (7) Dinding selongsong bom, (8) Peralatan persenjataan dan sekring, (9) Laras senjata, baja, diameter sekitar 10 cm, panjang 200 cm, (10) Kabel persenjataan,

(11) Rakitan tamper, baja, (12) "Target" uranium-235, dua cincin (38 kg), (13) Rakitan tamper/reflektor, karbida tungsten, (14) Inisiator neutron, (15) Antena radar sekering Archie, (16) Reses untuk colokan pengamanan boron (tidak diperlihatkan) yang akan dikeluarkan ke dalam.

Diawali dengan ledakan dari bahan peledak konvensional peluru berongga uranium bergerak dengan cepat menuju selinder target. Ketika selinder target masuk dalam peluru berongga terjadi massa kritis. Inilah awal dari reaksi berantai.



**Gambar 47** Skema sederhana Fat Man (dari Wikipedia)

Skema eksternal Fat Man, (1) Salah satu dari empat sekering kontak AN 219, (2) Antena radar Archie, (3) Pelat dengan baterai (untuk meledakkan muatan di sekitar komponen nuklir), (4) X-Unit, perangkat penembakan yang ditempatkan di dekat muatan, (5) Engsel yang memperbaiki dua bagian elipsoidal bom, (6) Paket fisika (lihat detail di bawah), (7) Pelat dengan instrumen (radar, baroswitch, dan pengatur waktu), (8) Kolektor barotube, (9) Rakitan ekor California Parachute (lembaran aluminium 0,20 inci [5,1 mm])

Diawali dengan ledakan konvensional Uranium-238 dan polonium mengalami titik kritis sehingga memicu terjadinya reaksi berantai.

Senjata nuklir modern bekerja sedikit berbeda. Massa kritis bergantung pada kepadatan bahan: saat kepadatan meningkat, massa kritis menurun. Alih-alih menabrakkan dua bagian bahan bakar nuklir subkritis, senjata modern meledakkan bahan peledak kimia di sekitar bola subkritis (atau "lubang") logam uranium-235 atau plutonium-239. Gaya dari ledakan diarahkan ke dalam, memampatkan lubang dan mendekatkan atom-atomnya.

Setelah cukup padat untuk mencapai massa kritis, neutron disuntikkan, memulai reaksi berantai fisi dan menghasilkan ledakan atom.

#### **3.3.5.4 Astrofisika**

Model astrofisika memerlukan sejumlah besar informasi tentang reaksi nuklir dan struktur nuklir, dan data khusus yang diperlukan (Smith, 2003) (misalnya, jenis reaksi, rentang energi relevan, inti yang terlibat) sangat bervariasi dengan fenomena astrofisika yang dipelajari. Untuk reaksi, informasi yang diperlukan mencakup penampang untuk menentukan laju reaksi termonuklir dan nilai-Q untuk menentukan pelepasan energi nuklir. Faktor-S astrofisika merupakan penampang yang diproses juga sangat berguna karena mereka bervariasi jauh lebih lambat dengan energi daripada penampang, yang memungkinkan penampang diekstrapolasi ke energi di bawah yang telah diukur. Rincian lebih lanjut tentang kebutuhan data yang melibatkan reaksi yang disebabkan oleh partikel bermuatan, oleh neutron, dan oleh neutrino telah ditulis baru-baru ini (Goriely, 2023). Data struktur nuklir sangat berharga untuk menentukan laju reaksi yang tidak terukur, pembangkitan energi bintang, dan jalur reaksi nuklir. Beberapa informasi yang relevan meliputi massa, waktu peluruhan dan rasio percabangan, parameter resonansi (energi, spin, paritas, lebar) di atas ambang batas penangkapan partikel, energi pemisahan di dekat garis, potensial inti alfa, kerapatan level energi, dan parameter model optik (Paradela, 2023).

Ketersediaan berkas inti radioaktif merupakan salah satu perkembangan terbaru yang paling menarik dalam fisika nuklir. Berkas ini memungkinkan pengukuran langsung reaksi pada isotop tidak stabil yang mendorong ledakan bintang, serta memetakan sifat-sifat inti yang sebelumnya hanya dapat diperkirakan melalui teori atau sistematika. Pengukuran pada fasilitas berkas radioaktif telah mengubah pemahaman tentang proses astrofisika. Pandangan baru lainnya adalah fakta bahwa astrofisika nuklir eksperimental melibatkan pengukuran pada energi rendah dengan memanfaatkan reduksi latar belakang yang sangat besar di laboratorium bawah tanah. Misalnya, penampang reaksi termonuklir matahari untuk pertama kalinya telah diukur secara langsung pada energi yang sangat rendah yang ditemukan di inti Matahari melalui fasilitas akselerator bawah tanah.

Dikarenakan mustahil untuk mengukur semua reaksi nuklir dan informasi struktur yang dibutuhkan untuk simulasi astrofisika (Odestov, 2024), model

nuklir memainkan peran penting dalam studi kosmos. Model nuklir tidak hanya menyediakan informasi penting yang tidak terukur, tetapi juga digunakan untuk mengekstrapolasi pengukuran ke daerah energi baru serta menyediakan kerangka kerja untuk memahami hasil laboratorium. Kemajuan signifikan telah dicapai dalam pemodelan nuklir dalam beberapa tahun terakhir, dengan fokus baru pada model mikroskopis global yang dapat memberikan prediksi dengan akurasi yang menyaingi model fenomenologis yang disesuaikan untuk rentang massa tertentu. Telah ada sejumlah perhitungan yang mengesankan tentang sifat dan reaksi yang melibatkan ribuan inti. Sangat penting untuk membandingkan perhitungan global ini dengan pengukuran eksperimental sedapat mungkin. Fasilitas radiasi radioaktif sangat penting dalam hal ini, karena memungkinkan eksplorasi bagian daerah nuklir yang belum dipetakan.

Diperlukan strategi untuk memperbaiki situasi terkini dalam data nuklir untuk studi astrofisika. Upaya evaluasi khusus yang diperluas diperlukan jika dataset nuklir yang akurat dan terkini akan diproduksi tepat waktu untuk studi astrofisika. Sementara sebagian besar upaya evaluasi hingga saat ini telah diproduksi oleh peneliti astrofisika nuklir, upaya yang diperluas kemungkinan besar akan memerlukan pemanfaatan tumpang tindih yang signifikan antara data nuklir dan komunitas astrofisika nuklir. Misalnya, anggota Kelompok kerja evaluasi penampang lintang mengevaluasi reaksi penting untuk berbagai aplikasi, beberapa di antaranya juga penting untuk astrofisika. Ada banyak dataset penting yang diperlukan untuk penelitian astrofisika, termasuk reaksi yang diinduksi partikel bermuatan untuk tahap pembakaran diam dan eksplosif di bintang, dan reaksi yang diinduksi neutron untuk sintesis unsur-unsur berat. Daftar sebagian proyek evaluasi meliputi: reaksi pada isotop radioaktif dengan massa kurang dari 40 yang diperlukan untuk mendukung pekerjaan baru di fasilitas radiasi radioaktif, kompilasi informasi struktur nuklir yang disempurnakan pada dripline proton dan neutron, dan reaksi ( $\alpha$ , n) pada inti dari O hingga Si yang menghasilkan neutron untuk s-proses. Informasi fisika nuklir sangat penting untuk memahami banyak fenomena dalam astrofisika. Sudah ada banyak data astrofisika nuklir yang tersedia secara daring. Namun, diperlukan upaya khusus untuk memastikan bahwa kumpulan data ini diperbarui untuk menyertakan karya eksperimental dan teoretis terbaru.

## 4 PENUTUP DAN RISET LANJUTAN

Buku ini telah memberikan informasi sekilas tentang data nuklir. Meskipun demikian, telah cukup menggambarkan tentang pentingnya eksistensi data nuklir sebagai cabang keilmuan yang cukup fundamental dalam sains dan teknologi nuklir.

Sebagaimana yang telah dipaparkan di ketiga bab buku ini, teknologi nuklir dapat dianalogikan dengan pembuatan baju oleh seorang tukang jahit. Penjahit baju tidak akan bisa membuat pola baju ketika data-data terkait ukuran tubuh pelanggannya tidak diperoleh. Dengan data-data tersebut penjahit mampu menghasilkan karya yang beraneka-ragam dan bermanfaat. Bahkan penjahit apabila ingin menghasilkan baju yang berbeda dari biasanya maka akan membutuhkan data-data baru yang tidak ada sebelumnya bahkan dapat berupa data-data yang tidak standard. Demikianlah ilustrasi dari analogi ini, teknologi nuklir dan data nuklir adalah siklus yang tidak pernah berhenti saling mendukung satu sama lainnya.

Data nuklir dapat terbagi menjadi dua bagian besar, yaitu data nuklir untuk energi dan data nuklir untuk radiasi. Pembagian ini didasarkan kepada aplikasi yang membutuhkannya. Meskipun disiplin keilmuan antara energi dan radiasi berawal dari satu keilmuan yaitu fisika nuklir akan tetapi perlakukannya di dalam data nuklir akan menjadi dua bagian terpisah.

Penelitian khusus yang dilakukan dan dikembangkan oleh penulis adalah reaksi nuklir fisi. Reaksi fisi adalah peristiwa fisis yang menjadi tulang punggung data nuklir untuk energi. Reaksi fisi sangatlah kompleks tidak cukup untuk menjadi satu fokus disiplin keilmuan. Untuk itu penulis memilih fokus pada penelitian proses fisi dan produk fisi.

Sebagaimana yang telah diceritakan oleh buku ini, proses fisi dan produk fisi menjadi satu paket penelitian. Oleh karenanya, penulis merencanakan penelitian yang lebih mikroskopik untuk proses fisi ini. Diharapkan dengan mengenal lebih dalam proses fisi secara mikroskopik, maka proses makroskopiknya dapat dibangun lebih komprehensif dan terintegrasi. Harapan besarnya adalah mampu melengkapi data-data nuklir produk fisi untuk berbagai nuklida dengan rentang energi yang lebih rinci dan rentang nomor massa yang lebih lengkap.



# UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah Swt., atas segala nikmat, karunia, dan rahmat-Nya yang telah diberikan sehingga penulis memperoleh amanah sebagai Guru Besar di Institut Teknologi Bandung (ITB) dalam Bidang Data Nuklir.

Ucapan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada pimpinan ITB, pimpinan dan anggota Forum Guru Besar dan Senat Akademik, serta seluruh Sivitas Akademik ITB atas kesempatan dan dukungan yang diberikan kepada penulis.

Ucapan terima kasih dan penghargaan penulis sampaikan pula kepada Dekanat, Senat, kolega dosen, dan tenaga kependidikan FMIPA ITB yang telah mendukung dan banyak membantu mulai dari tahap persiapan, proses pengajuan, sampai terbitnya SK Guru Besar. Ucapan terima kasih dan penghargaan juga disampaikan kepada rekan sejawat dosen dan tenaga kependidikan di Prodi Fisika.

Ucapan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya penulis sampaikan kepada Prof. Zaki Suud, Prof. Triyanta, Prof. Marsongkohadi (Alm.), Dr. Hans. J. Wospakrik (Alm.), atas segala bimbingan dan motivasi yang diberikan bagi penulis.

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Prof. Zaki Suud (FMIPA ITB), Prof. Abdul Waris (FMIPA ITB), Prof. Satria Bijaksana (FMIPA ITB), Prof. Sulaksono Anto (UI), Prof. Husin Alatas (IPB), Prof. David Marpaung (University of Twente) yang telah memebrikan rekomendasi untuk usulan guru besar penulis.

Tidak lupa penulis ucapkan terima kasih kepada rekan-rekan dosen KK Fisika Nuklir dan Biofisika, Prof. Sidik Permana atas keluagan waktunya menjadi *reviewer* buku ini, dan rekan-rekan lainnya yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Penulis ucapkan terima kasih dan penghargaan secara khusus kepada ibu mertua tercinta Ibu Sutarsih yang selalu memberikan dukungan dan doa tiada henti-hentinya. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada kakak-

kakak dan seluruh keluarga besar yang selalu memberikan dukungan, semangat, doa, dan bantuan.

Terakhir, penulis sampaikan ucapan terima kasih kepada istri tercinta, Aisyah Kusumawaty, serta anak-anak Muhammad Abdulloh, Muhammad Ihsan, dan Khoerul Ummah yang selalu setia menemani, menghibur, memberikan keceriaan dan memberikan dukungan penuh sehingga menjadi sumber kekuatan, semangat, dan inspirasi bagi penulis.

Sekali lagi, penulis ucapkan terima kasih dan penghargaan kepada semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, tetapi telah memberikan kontribusi positif dalam perjalanan ini.

Semoga Allah Swt. memberikan balasan berlipat ganda atas kebaikan yang telah diberikan. Aamiin ya robbal 'alamiin.

# DAFTAR PUSTAKA

- Chadwick MB, Obložinský, P., & Herman, M. (2006). ENDF/B-VII. 0: next generation evaluated nuclear data library for nuclear science and technology. *Nucl Data Sheets* , 2931.
- Audi, , G., Wapstra, A. H., & Thibault, C. (2013). The Ame2003 atomic mass evaluation:(II). Tables, graphs and references. *Nuclear Physics A*, 337.
- Audi, G., Bersillon, O., Blachot, J., & Wapstra, A. (2003). The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties. *Nuclear physics A*, 3.
- Bohr, N., & Wheeler, J.A. (1953). The mechanism of nuclear fission. *Physical Review*, 426.
- Briesmeister, J. F. (2000). *MCNPTM-A general Monte Carlo N-particle transport code*. LA-13709-M, Los Alamos National Laboratory, 2.
- Broeshart, H. (1959). The application of radio-isotope techniques to fertiliser placement studies in oilpalm cultivation. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 95.
- Brosa, U., & Grossmann, S. (1984). Random neck rupture in deep-inelastic collisions. *Journal of Physics G: Nuclear Physics*, 933.
- Brosa, U., et. al. (1999). Systematics of fission-channel probabilities. *Physical Review C*, 767.
- Brown, F. B. (2002). MCNP version 5. *Trans. Am. Nucl. Soc*, 02-3935.
- Cameron, A. G. (1957). A revised semiempirical atomic mass formula. *Canadian Journal of Physics*, 1021.
- Dunford, C. L. (1998). *NuDat System for Access to Nuclear Data* . Berkeley: IAEA-NDS-205 .
- Feenberg,, E., & Hammack, K. C. (1949). Nuclear shell structure. *Physical Review*, 1877.
- Fink, H. J. (1974). Theory of fragmentation dynamics in nucleus-nucleus collisions. *Zeitschrift für Physik*,, 31.
- Firestone, R. (2003). Overview of Nuclear Data, Lecture Notes. *Workshop on Nuclear Data for Science and Technology: Material Analysis*. Berkeley.

- Gamow, G. (1957). Mass defect curve and nuclear constitution. *roc. R. Soc. Lond. A*, 632.
- Gegier, H., & Marsden, E. . (1909). On a diffuse reflection of the  $\alpha$ -particles. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*,, 495.
- Goriely, S. (2023). Nuclear properties for nuclear astrophysics studies. *The European Physical Journal A*, 16.
- Howell, R. W., Wassels, B. W., & Loevinger, R. (1999). The MIRD Perspective 1999. *Journal Nuclear Medicine*, 3S.
- Ichikawa, T., Möller, P., & Sierk, A. J. (2013). Character and prevalence of third minima in actinide fission barriers. *Physical Review C—Nuclear Physics*, 054326.
- Ignatjuk, A. V., & Maslov, V. M. (1992). Fission Model for Cross Section Calculations. *In Proc. Int. Symp. Nuclear Data Evaluation Methodology*, 440.
- Katakura, J. I. (2003). *A systematics of fission product mass yields with 5 gaussian functions*. JAERI-RESEARCH--2003-004.
- Kraybill, H. F., , & Brunton, D. C. (1960). Radiation Preservation of Food, Commercialization Technology and Economics in Radiation Processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 349.
- Kurniadi, R. (2018). Computational aspect of fermi distribution application on fission yield data calculation. *Results in Physics*, 651.
- Kurniadi, R., Waris, A., & Viridi, S. (2016). Monte Carlo simulation based toy model for fission process. *International Journal of Modern Physics C*, 1650030.
- Kurniadi, R., Waris, A.,, & Viridi, S. (2016). Monte Carlo simulation based toy model for fission process. *International Journal of Modern Physics C*, 1650030.
- Lawrence, J. N. (1965). Static fission-barrier calculations of a two-parameter liquid drop. *Physical Review*, B1227.
- Lemaire, S. e. (2005). Monte Carlo approach to sequential neutron emission from fission fragments. *Physical Review C* , 024601.
- Maruhn, J. A. (1980). Quantum fluctuations within the fragmentation theory. *Progress in particle and nuclear physics*, 257.

- Moriyama, H., & Ohnishi, T. (1974). *Systematics of fission fragment mass-yield curves*. kyoto: Technical Reports of the Institute of Atomic Energy.
- Nix, J. R. (1969). Further studies in the liquid-drop theory on nuclear fission. *Nuclear Physics A*, 241.
- odestov, M. e. (2024). MANCHA3D Code: Multipurpose Advanced Nonideal MHD Code for High-Resolution Simulations in Astrophysics. *Solar Physics*, 23.
- Otuka. (2014). *Nucl Data Sheets*, 272.
- Paradela, C., , Kopecky, S., & Schillebeeckx, P. . (2023). Experimental work on Nuclear Astrophysics at JRC GELINA facility. *EPJ Web of Conferences* , 11008.
- Peierls, R. E, & Yoccoz, J. (1957). the collective model of nuclear motion. *Proceedings of the Physical Society*, 381.
- Piekarewicz, J. (2015). Nuclear breathing mode in neutron-rich nickel isotopes: Sensitivity to the symmetry energy and the role of the continuum. *Physical Review C*, 014303.
- Ring, P, & Schuck, P. (2004). *The nuclear many-body problem*. Springer Science & Business Media.
- Rowe, D. J. (1985). Microscopic theory of the nuclear collective model. *Reports on Progress in Physics*, 1419.
- Schwerer, O. (2007). Introduction to IAEA NDS. *Workshop on Nuclear Data for Science and Technology*. Trieste.
- Shibata, K. (2012). Evaluation of neutron nuclear data for erbium. *Journal of nuclear science and technology*, 824.
- Sierk, A. J. (1986). Macroscopic model of rotating nuclei. *Physical Review C*, 2039.
- Singh, B.,, Singh, J., , & Kaur, A. (2013). Applications of radioisotopes in agriculture. *International Journal of Biotechnology and Bioengineering Research*, 167.
- Smith, M. S. (2003). Nuclear data for astrophysics. *Nuclear Physics A*, 339.
- Strutinsky, V. M. (1975). The shell correction and self-consistent deformation energies. *Nuclear Physics A*, 197.

- Tuli, J. K. (2001). *Evaluated Nuclear Structure Data File: A Manual for preparation of data sets*. Berkeley: BNL.
- Tuli, J. K. (2011). *Nuclear Wallet Cards*. Berkeley: Brookhaven Nuclear Lab.
- Weaver, O. L, Cusson, R. Y., & Biedenharn, L. C. . (1976). Nuclear rotational-vibrational collective motion with nonvanishing vortex-spin. *Annals of Physics*, 493.
- Wei, Z. e. (2015). Monte Carlo simulation of fission yields, kinetic energy, fission neutron spectrum and decay  $\gamma$ -ray spectrum for  $^{232}\text{Th}(n,f)$  reaction induced by  $^3\text{H}(d,n)$   $^4\text{He}$  neutron source. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 455.
- Yukawa, H. (1935). On the interaction of elementary particles. I. *Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan. 3rd Series*, 48.
- Z., W. C. (1935). Zur Theorie der Kernmassen. *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nucle*, 431.
- Zhigang, G., Hongwei, Y., & Youxiang, Z. (2007). The updated version of the Chinese evaluated nuclear data library (CENDL-3.1) and China nuclear data evaluation activities. *conference on nuclear data for science and technology*. . EDP Sciences.

# CURRICULUM VITAE



Nama : Prof. Dr. Rizal Kurniadi  
Tempat/tgl lahir : Cimahi/ 11 Februari 1971  
Kel. Keahlian : Fisika Nuklir dan Biofisika  
Alamat Kantor : Jl. Ganesa no. 10 Bandung 40132  
Nama Istri : Aisyah Kusumawaty  
Nama Anak : 1. Muhammad Abdulloh  
2. Muhammad Ihsan  
3. Khoerul Ummah

## I. RIWAYAT PENDIDIKAN

1. SDN Negeri 2 Cimahi (1978-1984)
2. SMPN 1 Cimahi (1984-1987)
3. SMAN 2 Cimahi (1987-1990)
4. ITB, Sarjana Fisika (1990-1995)
5. ITB, Magister Fisika (1997-1999)
6. ITB, Doktor Fisika (1999-2004)

## II. RIWAYAT KERJA DI ITB

1. Kepala Lab Komputasi Fisika (2002-2006)
2. Tim penyedia barang dan jasa direktorat logistik ITB (2000-2003)
3. Penanggung jawab jaringan dan website FMIPA ITB (2000-2007)
4. Tim Pengkajian Kurikulum Program Studi Sarjana, Magister, dan Doktor di Lingkungan FMIPA ITB (2023)
5. Tim Kurikulum Program Studi Pascasarjana Fisika FMIPA ITB (2024)
6. Anggota Majelis Keilmuan Fisika di Lingkungan FMIPA (2022-sekarang)
7. Ketua Program Studi Pascasarjana Fisika FMIPA ITB (2022-sekarang)

## III. RIWAYAT KEPANGKATAN

1. Penata Muda III/a : 1 Februari 1998
2. Penata III/c : 1 April 2006
3. Penata Tk. I III/d : 1 Oktober 2010
4. Pembina IV/a : 1 Oktober 2012

5. Pembina Tk. 1 IV/b : 1 april 2018
6. Pembina Utama Muda IV/c : 1 april 2024

#### **IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL**

1. Asisten Ahli Madya : 1 Oktober 2000
2. Asisten Ahli : 1 Januari 2001
3. Lektor : 1 Oktober 2005
4. Lektor Kepala : 1 April 2010
5. Guru Besar : 1 Agustus 2023

#### **V. KEGIATAN PENELITIAN**

1. Pengembangan kode TALYS untuk data fission yield, FMIPA, PI: Rizal Kurniadi, 2024
2. Sosialisasi dan Workshop Keilmuan Fisika Nuklir dan Biofisika di Indonesia, PPMI KK FMIPA, PI: Sidik Permana, 2024
3. Pendekatan Feed Forward untuk Melengkapi Data Produk Fisi, PPMI, PI: Rizal Kurniadi, 2023
4. Pengamatan dan Sosialisasi Radiasi Lingkungan di Provinsi Bangka Belitung, PPMI, PI: Sidik Permana, 2023
5. Penampang Lintang Fusi dalam Formalisme Medan Rata-rata Relativistik, PDUPT, PI: Rizal Kurniadi, 2022
6. Sosialisasi dan Workshop Keilmuan Fisika Nuklir dan Biofisika di Indonesia, PDUPT, PI: Zaki Suud, 2022
7. PPMI KK Fisika Nuklir dan Biofisika: Peranan Fisika pada Pengembangan Energi Nuklir, Kesehatan, dan Biomaterial, PPMI FMIPA, PI: Abdul Waris, 2022
8. Pembentukan energi deformasi semi empiric dari fisi nuklir dengan menggunakan kombinasi tiga model – FRDM FTM dan RNRM, Riset DIKTI, PI: Rizal Kurniadi, 2021
9. Fision Toy Model dan Shell Correction pada Perhitungan Fission Barrier, PPMI FMIPA, PI: Rizal Kurniadi, 2021
10. Pembentukan energy permukaan inti melalui Deformation-dependent Nuclear Radius dan kontribusinya pada basis data nuklir, Riset Dikti, PI: Rizal Kurniadi, 2020

11. Pembentukan energi deformasi semi empiric dari fisi nuklir dengan menggunakan kombinasi tiga model – FRDM, FTM dan RNRM, Riset Dikti, PI: Rizal Kurniadi, 2020
12. Pembentukan energy permukaan inti melalui Deformation-dependent Nuclear Radius dan kontribusinya pada basis data nuklir, Riset Dikti, PI: Rizal Kurniadi, 2019
13. Perhitungan Fission Yield Curve melalui aplikasi distribusi Fermi-Dirac dalam Fission Toy Model, Riset Dikti, PI: Rizal Kurniadi, 2019
14. Perhitungan Fission Yield Curve melalui aplikasi distribusi Fermi-Dirac dalam Fission Toy Model, Riset Dikti, PI: Rizal Kurniadi, 2018
15. Penggunaan Fungsi Distribusi Fermi-Dirac dalam Fission Toy Model untuk Penentuan Puncak-puncak Kurva fission barrier, Riset Dikti, PI: Rizal Kurniadi, 2018
16. Penggunaan Fungsi Distribusi Fermi-Dirac dalam Fission Toy Model untuk Penentuan Puncak-puncak Kurva fission barrier, Riset Dikti, PI: Rizal Kurniadi, 2017
17. Pengaruh Parameter Pemuluran Fission Toy Model pada Kurva Fission Barrier, Riset ITB, PI: Rizal Kurniadi, 2016
18. Implementasi Fenomena Distribusi Gaussian-Like pada Fission Toy Model, Riset ITB, PI: Rizal Kurniadi, 2015
19. Korelasi antara Pendekatan Mikroskopik Fission Toy Model dengan Fisi Nuklir Inti-inti Berat, Riset ITB, PI: Rizal Kurniadi, 2014
20. PENDEKATAN MAKROSKOPIK PADA DISTRIBUSI MASSA TRIPLE GAUSSIAN DAN PENDEKATAN MIKROSKOPIK UNTUK DINAMIKA FISI, Riset ITB, PI: Rizal Kurniadi, 2013
21. Aproksimasi Polinomial pada Deskripsi Neck Rupture Model serta Implementasi nya terhadap Penentuan Besaran-besaran Fisis Nuclear Elongation, Riset ITB, PI: Rizal Kurniadi, 2012
22. Metoda Regularisasi Bayesian Pada Random Neck Rupture Model (RNRM), Riset ITB, PI: Rizal Kurniadi, 2012

## VI. PUBLIKASI

1. **Kurniadi, R.**, Marsongkohadi, Su'ud, Z., & Triyanta. (2002). An Alternative Calculation Technique in the Generator-Coordinate Method (GCM) to Determine the Ground State Energies of 2H and 4He and the Electric Quadrupole Moment of 2H. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 39(sup2), 463-466.
2. **Kurniadi, R.**, Marsongkohadi, M., Su'ud, Z., & Triyanta, T. (2006). Preliminary Studies of Thermal Wavelength Approximation in 208Pb and 91Zr Hot Nuclei. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 38(1), 29-36.
3. **Kurniadi, R.**, Marsongkohadi, M., Su'ud, Z., & Triyanta, T. (2003). Proyeksi Kernel GCM pada Sembarang Fungsi. *Indonesian Journal of Physics*, 14(4), 219-221.
4. **Kurniadi, R.**, Marsongkohadi, M., Su'ud, Z., & Triyanta, T. (2005). Alpha-cluster Model for 6Li, 8Be and 12C Nuclei within the Framework of the Generator Coordinate Approach. *Indonesian Journal of Physics*, 16(3), 57-61.
5. Waris, A., Nawangsary, W., Pramuditya, S., & **Kurniadi, R.** (2007). Thorium Fuel Cycle in BWR with Free 233U. *Indonesian Journal of Physics*, 18(4), 91-94.
6. Waris, A., **Kurniadi, R.**, Perkasa, Y. S., & Suwoto, S. (2008). Isotopic Fission-yield Calculation of U-233, U-238 and Th-232 for Fast Energy Spectrum. *Indonesian Journal of Physics*, 19(1), 29-32.
7. Waris, A., **Kurniadi, R.**, Perkasa, Y. S., & Suwoto, S. (2008). Determination of Energy Dependence Level Density Parameter and its Application in Fission Products Calculation of Pu-238. *Indonesian Journal of Physics*, 19(4), 115-118.
8. **Kurniadi, R.**, & Waris, A. (2008). Calculation of Level Density Parameter of  $20 < A < 110$  Hot Nuclei. *Indonesian Journal of Physics*, 17(2), 39-41.
9. Waris, A., Su'ud, Z., & **Kurniadi, R.** (2009). TRU Recycling in Thorium Fuel Cycle of PWR with various moderator-to-fuel volume ratio.
10. Perkasa, Y. S., **Kurniadi, R.**, & Waris, A. (2009). Application of TALYS code for calculation of fission cross section and fission yield of several heavy nuclides. *Indonesian Journal of Physics*, 20(3), 49-53.
11. **Kurniadi, R.**, & Waris, A. (2007). The New Fugacity Calculation in Finite Nuclear Matter. *Indonesian Journal of Physics*, 18(3), 67-71.

11. Waris, A., **Kurniadi, R.**, & Su'ud, Z. (2008). Plutonium and Minor Actinides Recycling in Standard BWR using Equilibrium Burnup Model. *ITB Journal of Science A*, 40, 15-23.
12. Waris, A., Rahmanto, T., Taufiq, I., **Kurniadi, R.**, & Su'ud, Z. (2009). Study of Transuranium Recycling in PWR with 3-D Burnup Analysis using SRAC-COREBN Code. *Indonesian Journal of Physics*, 20(4), 95-98.
13. Su'ud, Z., **Kurniadi, R.**, Rida, S. N. M., & Zuhair, Z. (2009). Feasibility Design Study of Long Life BWR with Natural Uranium/Thorium as Fuel Cycle Input. *Indonesian Journal of Physics*, 20(1), 13-16.
14. **Kurniadi, R.**, Perkasa, Y. S., Waris, A., & Suwoto, S. (2009). Calculation of Level Density Parameter of Nuclear Reaction Using Neural Network. *Indonesian Journal of Physics*, 20(3), 55-59.
15. **Kurniadi, R.**, Perkasa, Y. S., & Waris, A. (2010). Moving Average as an Alternative Technique in Determination of Nuclear Shell Correction. *Indonesian Journal of Physics*, 21(4), 121-123.
16. Perkasa, Y. S., Waris, A., **Kurniadi, R.**, & Zaki, S. U. (2012). Implementation of New Fission Barrier Model in TALYS Code. *Applied Mechanics and Materials*, 110, 2475-2480.
17. Abdullah, A. G., Su'ud, Z., **Kurniadi, R.**, & Kurniasih, N. (2012). ULOF Accident Analysis for 300 MWt Pb-Bi Cooled MOX Fuelled SPINNOR Reactor. *Applied Physics Research*, 4(1), 91.
18. Waris, A., Shafii, M. A., Pramuditya, S., **Kurniadi, R.**, & Su'ud, Z. (2012). Effect of void-fraction on characteristics of several thorium fuel cycles in BWR. *Energy conversion and management*, 63, 11-16.
19. Sugiharto, S., **Kurniadi, R.**, Abidin, Z., Stegowski, Z., & Furman, L. (2013). Prediction of separation length of turbulent multiphase flow using radiotracer and computational fluid dynamics simulation. *Atom Indonesia*, 39(1), 32-39.
20. Irawan, D., Viridi, S., **Kurniadi, R.**, & Waris, A. (2015). Classical Approach for the Fusion Reaction of Deuterium-Tritium Using 2-D Velocity Verlet Method. *Indonesian Journal of Physics*, 26(2), 36-39.
21. Jubaidah, J., & **Kurniadi, R.** (2015, September). Fission yield calculation using toy model based on Monte Carlo simulation. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1677, No. 1). AIP Publishing.

22. **Kurniadi, R.**, Waris, A., & Viridi, S. (2016). Monte Carlo simulation based toy model for fission process. *International Journal of Modern Physics C*, 27(03), 1650030.
23. **Kurniadi, R.** (2018). Computational aspect of fermi distribution application on fission yield data calculation. *Results in Physics*, 11, 651-655.
24. Rohanda, A., Waris, A., **Kurniadi, R.**, Bakhri, S., Pardi, P., & Haryanto, D. (2020). Validation and improvement of gamma heating calculation methods for the GA Siwabessy multipurpose reactor. *Nuclear Science and Techniques*, 31, 1-10.
25. Rahmansyah, A., Purnamasari, D., **Kurniadi, R.**, & Sulaksono, A. (2022). Generalized Tolman-Oppenheimer-Volkoff model and neutron stars. *Physical Review D*, 106(8), 084042.
26. **Kurniadi, R.** (2022). Skyrme-Hartree-Fock on Deformed Nucleus for the Island of Inversion Case. *Indonesian Journal of Physics*, 33(2).
27. **Kurniadi, R.** (2022). Modified Boltzmann Factor on Rupture Probability. *Indonesian Journal of Physics*, 33(2).
28. **Kurniadi, R.**, Sulaksono, A., & Perkasa, Y. S. (2022). Calculation of barrier potential height using fraction parameter. *Results in Physics*, 32, 105038.
29. **Kurniadi, R.**, Suud, Z., & Perkasa, Y. S. (2022). The Evaluation of Fission Barrier Height by Fission Toy Model Approach. *Atom Indonesia*, 48(1), 15-19.
30. **Kurniadi, R.** (2023). Total Kinetic Energy of Fission Fragments based on Fission Product Data. *Indonesian Journal of Physics*, 34(1).
31. Waris, A., **Kurniadi, R.**, Su'ud, Z., & Permana, S. (2007). Preliminary study on characteristics of equilibrium thorium fuel cycle of BWR.
32. **Kurniadi, R.**, Waris, A., & Perkasa, Y. S. (2007). Single particle level density calculation using extended Wood Saxon potential. In *International Conference on Advances in Nuclear Science and Engineering in Conjunction with LKSTN* (Vol. 313, p. 315).
33. Waris, A., Perkasa, Y. S., & **Kurniadi, R.** (2009, November). Implementation of extended wood-saxon potential in  $^{232}\text{Th}$  nuclear fission mass yield calculation. In *International Conference on Instrumentation, Communication, Information Technology, and Biomedical Engineering 2009* (pp. 1-3). IEEE.

34. **Kurniadi, R.**, Perkasa, Y. S., Basar, K., & Waris, A. (2010, June). Fission cross section calculation using TALYS based on two different level density models. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1244, No. 1, pp. 300-307). American Institute of Physics.
35. Waris, A., Permana, S., **Kurniadi, R.**, Su'ud, Z., & Sekimoto, H. (2010, June). Study on Equilibrium Characteristics of Thorium-Plutonium-Minor Actinides Mixed Oxides Fuel in PWR. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1244, No. 1, pp. 85-90). American Institute of Physics.
36. Sugiharto, Su'ud, Z., **Kurniadi, R.**, Waris, A., Santoso, S. B., Abidin, Z., & Santoso, G. B. (2010, June). Radiotracer Dilution Method for Mercury Inventory Study in Electrolytic Cells. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1244, No. 1, pp. 247-252). American Institute of Physics.
37. Sugiharto, Su'ud, Z., **Kurniadi, R.**, Waris, A., & Abidin, Z. (2010, December). Analysis Of Residence Time Distribution Of Fluid Flow By Axial Dispersion Model. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1325, No. 1, pp. 257-260). American Institute of Physics.
38. Prayudhatama, D., Waris, A., Kurniasih, N., & **Kurniadi, R.** (2010, June). GPU Based General-Purpose Parallel computing to Solve Nuclear Reactor In-Core fuel Management Design and Operation Problem. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1244, No. 1, pp. 121-126). American Institute of Physics.
39. Surbakti, R., Waris, A., Basar, K., Permana, S., & **Kurniadi, R.** (2012, June). Influence of void fraction on plutonium recycling in BWR. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1454, No. 1, pp. 77-80). American Institute of Physics.
40. Viridi, S., **Kurniadi, R.**, Waris, A., & Perkasa, Y. S. (2012, June). A classical approach in simple nuclear fusion reaction  $1\text{H}_2 + 1\text{H}_3$  using two-dimension granular molecular dynamics model. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1448, No. 1, pp. 170-176). American Institute of Physics.
41. Waris, A., Aji, I. K., Novitrian, **Kurniadi, R.**, & Su'ud, Z. (2012, June). Plutonium and minor actinides utilization in Thorium molten salt reactor. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1448, No. 1, pp. 115-118). American Institute of Physics.

42. Perkasa, Y. S., Waris, A., **Kurniadi, R.**, & Su'ud, Z. (2012, June). Calculation of fission yield using fission barrier from optimal shapes of liquid drop model. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1448, No. 1, pp. 297-306). American Institute of Physics.
43. Waris, A., Nuha, **Kurniadi, R.**, & Su'ud, Z. (2012, June). Preliminary study on direct recycling of spent PWR fuel in PWR system. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1448, No. 1, pp. 135-141). American Institute of Physics.
44. **Kurniadi, R.**, Perkasa, Y. S., & Waris, A. (2012, June). Neck curve polynomials in neck rupture model. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1448, No. 1, pp. 291-296). American Institute of Physics.
45. Widita, R., **Kurniadi, R.**, Darma, Y., Perkasa, Y. S., & Trianti, N. (2012, June). Segmentation of elastic organs using region growing. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1448, No. 1, pp. 219-222). American Institute of Physics.
46. **Kurniadi, R.**, Waris, A., & Viridi, S. (2014, September). Monte Carlo based toy model for fission process. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1615, No. 1, pp. 133-136). American Institute of Physics.
47. Perkasa, Y. S., Waris, A., **Kurniadi, R.**, & Su'ud, Z. (2014, September). Comparative studies of actinide and sub-actinide fission cross section calculation from MCNP6 and TALYS. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1615, No. 1, pp. 128-132). American Institute of Physics.
48. Perkasa, Y. S., Waris, A., **Kurniadi, R.**, & Su'ud, Z. (2014, September). Study of asymmetric fission yield behavior from neutron-deficient Hg isotope. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1615, No. 1, pp. 96-100). American Institute of Physics.
49. Sulistyowati, R., **Kurniadi, R.**, & Srigutomo, W. (2015, September). Stability analysis of predator-prey model on the case of aerosol-cloud-precipitation interactions. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1677, No. 1). AIP Publishing.
50. Sulistyowati, R., Viridi, S., **Kurniadi, R.**, & Srigutomo, W. (2016, November). Relation between cloud thickness-cloud number concentration differences and rain occurrence based on Koren-Feingold model. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 771, No. 1, p. 012047). IOP Publishing.
51. Ramdhani, R. N., Prastyo, P. A., Waris, A., & **Kurniadi, R.** (2017, July). Neutronics analysis of SMART small modular reactor using SRAC

- 2006 code. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 877, No. 1, p. 012067). IOP Publishing.
52. Prastyo, P. A., Waris, A., **Kurniadi, R.**, & Pramuditya, S. (2017, July). Preliminary Study of Plutonium Utilization in AP1000 Reactor. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 877, No. 1, p. 012003). IOP Publishing.
  53. Nurhandoko, B. E. B., **Kurniadi, R.**, Hadi, M. R. A., & Komara, I. R. (2017). Study of gamma spectrometry laboratory measurement in various sediment and vulcanic rocks. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 799, No. 1, p. 012027). IOP Publishing.
  54. Baskara, R. F., Waris, A., **Kurniadi, R.**, Basar, K., & Sahin, S. (2019, April). Advanced nuclear reactor AP1000 with ThO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> fuel. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1204, No. 1, p. 012135). IOP Publishing.
  55. **Kurniadi, R.** (2022, June). Comparative Evaluation on Nuclear Shell Correction Calculation using Regulation Bayesian and Moving Average Methods. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2243, No. 1, p. 012060). IOP Publishing.
  56. **Kurniadi, R.** (2022, June). Implementation of LSD Fission Barrier in Fission Cross Section Calculations. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2243, No. 1, p. 012061). IOP Publishing.
  57. Rohanda, A., Waris, A., **Kurniadi, R.**, & Bakhri, S. (2022, August). Gamma Heating Evaluation of Silicide RSG-GAS Multipurpose Reactor. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2328, No. 1, p. 012004). IOP Publishing.

## **VII. PENGHARGAAN**

1. Penghargaan 25 Tahun ITB (2023)
2. Satya Lencana Karya Satya 20 Tahun (2020)
3. Satya Lencana Karya Satya 10 Tahun (2012)
4. Dosen Terbaik Bidang Penelitian (Dies Natalis FMIPA ke 75 Tahun 2022).

## **VIII. SERTIFIKASI**

1. Serdos Nasional: 05 Juli 2010, Nomor Sertifikasi: 101104904090, Nomor Serdos: 0005170.

**ITB PRESS**

📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,  
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132  
☎ +62 22 20469057  
🌐 [www.itbpress.id](http://www.itbpress.id)  
✉ [office@itbpress.id](mailto:office@itbpress.id)  
👤 Anggota Ikapi No. 043/JBA/92  
📄 APPTI No. 005.062.1.10.2018

**Forum Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung**

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

🌐 [fgb.itb.ac.id](http://fgb.itb.ac.id)     [FgbItb](https://www.facebook.com/FgbItb)     [FGB\\_ITB](https://twitter.com/FGB_ITB)  
 [@fgbitb\\_1920](https://www.instagram.com/@fgbitb_1920)     [Forum Guru Besar ITB](https://www.youtube.com/ForumGuruBesarITB)

ISBN 978-623-297-585-9

