

AWAWARENESS DAN PENGANTAR TEKNOLOGI PLTN

Dasar, Keselamatan, Kebijakan,
Dan Masa Depan Energi Nuklir Indonesia



Ir. Heru Sriwidodo S., MM., IPU
Dr. Ir. H. M. Ahsin Sidqi, MM., IPU., ASEAN Eng., QRGP
Ir. Suharto Wiranu, MT., IPU

AWARENESS DAN PENGANTAR TEKNOLOGI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR (PLTN)

**Dasar, Keselamatan, Kebijakan, dan Masa Depan
Energi Nuklir Indonesia**

AWARENESS DAN PENGANTAR TEKNOLOGI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR (PLTN)

**Dasar, Keselamatan, Kebijakan, dan Masa Depan
Energi Nuklir Indonesia**

Penyusun:

**Ir. Heru Sriwidodo S., M.M., IPU
Dr. Ir. H. M. Ahsin Sidqi, MM., IPU., ASEAN Eng., QRGP
Ir. Suharto Wiranu, M.T., IPU**

Penerbit :



2026

AWARENESS DAN PENGANTAR TEKNOLOGI PEMBANGKIT LISTRIK TENGA NUKLIR (PLTN)

Dasar, Keselamatan, Kebijakan, dan Masa Depan
Energi Nuklir Indonesia

Oleh : **Ir. Heru Sriwidodo S., MM., IPU & Tim ITPLN**
Dr.Ir.H. M. Ahsin Sidqi, MM., IPU., ASEAN Eng., QRGP
Ir. Suharto Wiranu, MT., IPU

Penerbit : INSTITUT TEKNOLOGI PLN
Alamat : Menara PLN, Jl. Lingkar Luar Barat,
Duri Kosambi, Cengkareng,
Jakarta Barat 11750
Telp/Fax : (021) 544 0342, 544 0344
Email : -

Hak Cipta@2026 pada Penerbit

Hak cipta dilindungi oleh Undang Undang Pasal 72 ayat 1,2 dan 3 Undang-undang Republik Indonesia No. 19 Tahun 2002. Dilarang memperbanyak, sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari
Penerbit : INSTITUT TEKNOLOGI PLN

Cetakan Pertama, Januari 2026

Editor : Iriansyah B. Sangadji, S.Kom., M.Kom.
Design & Layout : Akhmad Fauzi

ISBN : -

Nomor Anggota IKAPI :
No.574/Anggota Luar Biasa /DKI/2019

KATA SAMBUTAN

INSTITUT TEKNOLOGI PLN

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa. Institut Teknologi PLN menyambut baik terbitnya buku "Awareness & Pengantar Teknologi PLTN" sebagai kontribusi akademik dalam mendukung peningkatan literasi energi nasional.

Sejalan dengan arah kebijakan ketenagalistrikan sebagaimana tertuang dalam RUPTL 2025-2034, penguatan pemahaman terhadap berbagai opsi energi bersih, termasuk PLTN, menjadi semakin penting. Buku ini disusun sebagai materi pendukung program awareness dan pembelajaran berkelanjutan untuk memperkenalkan dasar teknologi, keselamatan, dan kerangka kebijakan energi nuklir secara ringkas dan mudah dipahami.

ITPLN mengapresiasi kolaborasi dengan PLN Puslitbang serta seluruh pihak yang terlibat. Semoga buku ini memberikan manfaat bagi mahasiswa, praktisi energi, dan masyarakat dalam membangun pemahaman yang objektif tentang masa depan energi Indonesia.

Salam hormat,

Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa M.K, M.T.,IPU.,
ASEAN Eng., APEC Eng

Rektor



KATA SAMBUTAN

GENERAL MANAGER PLN PUSLITBANG

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa. PLN Pusat Penelitian dan Pengembangan menyambut baik kehadiran buku "Awareness & Teknologi PLTN" sebagai bagian dari upaya memperkuat pemahaman terhadap teknologi pembangkit rendah karbon.

Dalam kerangka RUPTL 2025-2034, kajian terhadap berbagai opsi energi bersih perlu didukung oleh literasi yang memadai, mencakup aspek teknologi, keselamatan, regulasi, dan kesiapan sumber daya manusia. Buku ini diharapkan menjadi referensi awal yang membantu membangun perspektif yang berimbang dan berbasis sains.

PLN Puslitbang menyampaikan apresiasi kepada IT PLN dan seluruh tim penyusun. Semoga buku ini dapat memperkaya diskusi dan mendukung pengembangan kapasitas nasional di bidang energi.



Salam

Mochamad Soleh, ST., MT., IPM
General Manager PLN Puslitbang

KATA PENGANTAR

TIM ITPLN

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa. Atas rahmat-Nya, buku "Awareness dan Pengantar Teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)" ini dapat hadir sebagai bagian dari upaya kesadaran (awareness) dan literasi publik dalam memasuki era pemanfaatan energi nuklir secara aman dan bertanggung jawab.

Kami menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang mendukung penyusunan buku ini, termasuk para narasumber akademisi, peneliti dan praktisi industri.

Semoga buku ini menjadi kontribusi bermakna dalam membangun budaya keselamatan nuklir (nuclear safety culture) yang kuat, memperkuat pemahaman publik, dan membuka jalan bagi perkembangan talenta-talenta unggul yang akan memajukan teknologi nuklir Indonesia. Buku ini belum sempurna, untuk itu kami mohon masukan kepada semua pihak demi perbaikan kedepan.

Semoga Allah SWT senantiasa membimbing langkah kita dalam memanfaatkan ilmu pengetahuan untuk sebesar-besarnya kemaslahatan bangsa.

Salam hormat,

Penyusun

Tim ITPLN



DAFTAR ISI

KATA SAMBUTAN INSTITUT TEKNOLOGI PLN	i
SAMBUTAN GENERAL MANAGER PLN PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
PENDAHULUAN	1
Latar Belakang dan Tujuan	1
Pentingnya Awareness dalam Pengembangan Energi Nuklir	2
Negara Berkembang yang Berupaya dan Memiliki PLTN	5
BAB I DASAR-DASAR ENERGI NUKLIR	9
1.1 Fisika Nuklir Dasar	10
1.2 Reaksi Nuklir	10
1.2.1 Fisi Nuklir	10
1.2.2 Fusi Nuklir	12
1.3 Radioaktivitas	14
1.4 Bahan Bakar Nuklir Fisi	16
1.5 Fisika Reaktor Nuklir (Dasar Teori)	17
1.6 Perbedaan PLTN vs Bom Nuklir	19
BAB II PRINSIP KERJA PLTN	21
2.1 Komponen Utama PLTN	21
2.2 Siklus Tenaga Nuklir	22
2.3 Jenis-Jenis Reaktor Nuklir	23
BAB III SIKLUS BAHAN BAKAR NUKLIR	27
3.1 Penambangan Uranium dan Thorium	27
3.2 Pengayaan Uranium, Fabrikasi Bahan Bakar, dan <i>Reprocessing</i>	28
3.3 Pengelolaan Bahan Bakar Bekas dan Daur Ulang	29
3.4 Tantangan Ekonomi dan Lingkungan	29

3.5	Pentingnya Memahami Siklus Bahan Bakar Nuklir	30
BAB IV	KESELAMATAN DAN PENGENDALIAN PLTN	31
4.1	Prinsip Keselamatan Nuklir	31
4.2	Manajemen Bahan Bakar dan Limbah Nuklir	32
4.2.1	Siklus Bahan Bakar Nuklir	32
4.2.2	Pembentukan dan Penyimpanan Bahan Bakar Bekas Setelah Penggunaan	33
4.2.3	Limbah Radioaktif	35
4.3	Protokol Keselamatan dalam Keadaan Darurat	35
4.4	Kesiapan Darurat dan Manajemen Krisis dalam PLTN	25
4.4.1	Zona Eksklusi dan Zona Perlindungan	35
4.4.2	Prosedur Evakuasi dan Perlindungan Masyarakat	36
4.5	Teknologi Pemantauan Radiasi <i>Real-Time</i>	37
4.6	Contoh Kasus: Respons terhadap Insiden Fukushima (2011)	37
4.7	Dampak Lingkungan dan Sosial	39
4.7.1	Dampak Lingkungan	39
4.7.2	Aspek Sosial dan Ekonomi	40
4.7.3	Perbandingan dengan Sumber Energi Lain	41
BAB V	KERANGKA PENGATURAN GLOBAL DAN MANAJEMEN RISIKO TEKNOLOGI PLTN	43
5.1	IAEA 3S: <i>Safety, Security, Safeguards</i> - Fondasi Pengaturan Global	43
5.1.1	<i>Safety</i> (Keselamatan Nuklir): Melindungi dari Risiko yang Tidak Disengaja	43
5.1.2	<i>Security</i> (Keamanan Nuklir): Melindungi dari Tindakan Berbahaya yang Disengaja	45
5.1.3	<i>Safeguards</i> : Memastikan Penggunaan Damai	46
5.2	Manajemen Risiko Nuklir: Pendekatan Holistik dan Terintegrasi	47
5.2.1	Sumber dan Klasifikasi Risiko Utama	47
5.2.2	Strategi Mitigasi Risiko Terintegrasi	47
5.2.3	Pengambilan Keputusan Berbasis Risiko (<i>Risk-Informed Decision Making</i>)	48
5.3	Analisis Komparatif Risiko: PLTN dalam Perspektif Sistem Energi Global	48
5.3.1	Analisis dan Interpretasi Komparatif	50
5.3.2	Mitos vs. Fakta tentang Risiko Nuklir	51
5.4	Integrasi Kerangka 3S dan Manajemen Risiko dalam Program PLTN Nasional	51
5.4.1	<i>Roadmap</i> Implementasi Berfase	51
5.4.2	Peran dan Sinergi Multi-Pemangku Kepentingan	52
5.5	Kesimpulan	53

BAB VI	MASA DEPAN ENERGI NUKLIR	55
6.1	Teknologi PLTN Generasi IV: Masa Depan Energi Nuklir	55
6.2	Fusi Nuklir	59
6.2.1	Proyek Fusi Nuklir Terkini:	59
6.2.2	Integrasi dengan Energi Terbarukan	60
6.3	Reaktor Modular Kecil (SMR) dan Mikro-Reaktor: Nuklir Fleksibel dan Terjangkau	61
6.4	Penggunaan AI dan Digital Twin dalam Operasi PLTN	62
BAB VII	POTENSI PLTN DI INDONESIA	63
7.1	Potensi PLTN di Indonesia	63
7.2	Jenis PLTN Alternatif yang Sesuai	63
7.3	Regulasi dan Kebijakan PLTN di Indonesia	64
7.4	Studi Kelayakan dan Lokasi Potensial	65
BAB VIII	PENGOPERASIAN PLTN	67
8.1	Tahapan Pengoperasian PLTN	67
8.1.1	<i>Start-Up</i> (Pengaktifan Awal)	67
8.1.2	Paralel ke Jaringan Listrik	68
8.1.3	Operasi Beban (<i>Operation Demand</i>)	68
8.1.4	<i>Shutdown</i> (Penghentian Operasi)	68
8.2	Perbandingan Pengoperasian PLTN dengan PLTU Fosil	69
8.2.1	<i>Start-Up</i>	69
8.2.2	Paralel ke Jaringan Listrik	69
8.2.3	Operasi Beban	69
8.2.4	<i>Shutdown</i>	69
8.2.5	Keselamatan dan Dampak Lingkungan	70
BAB IX	MANAJEMEN PEMELIHARAAN DAN KEANDALAN PLTN	71
9.1	Manajemen Pemeliharaan di PLTN	71
9.1.1	Jenis Pemeliharaan di PLTN	71
9.1.2	Perencanaan dan Pengendalian Kerja di PLTN	72
9.2	Manajemen Keandalan di PLTN	72
9.3	Penerapan Teknologi dalam Manajemen Pemeliharaan dan Keandalan	73
9.4	Evaluasi dan Peningkatan Berkelanjutan	73
9.5	<i>Maintenance Prioritization Index (MPI)</i> pada Peralatan PLTN	74
BAB X	INTEGRASI PLTN DENGAN ENERGI TERBARUKAN	79
10.1	Peran PLTN dalam Sistem Energi Rendah Karbon	79
10.1.1	PLTN sebagai <i>Baseline Power</i> (Beban Dasar)	79

10.2	Konsep <i>Hybrid Energy System</i> : PLTN + Energi Terbarukan + Penyimpanan Hidrogen	80
10.3	Tantangan <i>Grid Stability</i> dan <i>Intermittency</i>	80
BAB XI	ASPEK SKILL DAN KOMPETENSI SDM UNTUK PLTN	83
11.1	Modal Dasar dan Potensi Indonesia	83
11.2	Operasi PLTN, Kompetensi Teknis	84
11.3	Peningkatan Kemampuan SDM PLN untuk PLTN	85
11.4	Langkah-Langkah Strategis untuk Mempersiapkan SDM	86
BAB XII	EKONOMI DAN PEMBIAYAAN PLTN	89
12.1	Model Pembiayaan PLTN	89
12.1.1	<i>EPC (Engineering, Procurement, and Construction)</i>	89
12.1.2	<i>BOO (Build-Own-Operate)</i>	90
12.1.3	<i>BOT (Build-Operate-Transfer)</i>	90
12.1.4	<i>PPP (Public-Private Partnership)</i>	90
12.2	Analisis Biaya Siklus Hidup (LCOE) dan Perbandingan dengan Energi Terbarukan	90
12.2.1	Biaya Siklus Hidup PLTN (LCOE - <i>Levelized Cost of Electricity</i>)	90
12.2.2	Perbandingan dengan Energi Terbarukan dan Fosil	91
12.3	Skema Pendanaan Internasional untuk PLTN	91
12.3.1	Dana dan Pinjaman dari Lembaga Keuangan Internasional ..	91
12.3.2	Dukungan dari Negara Pemilik Teknologi Nuklir	92
12.3.3	Mekanisme Pendanaan Hijau (<i>Green Financing</i>)	92
12.3.4	Pendanaan dari Swasta dan Konsorsium Industri	92
12.4	Perbandingan Biaya pembangunan PLTN	93
12.4.1	Biaya Pembangunan (Capex)	93
12.4.2	Biaya Operasi dan Pemeliharaan (Opex)	94
12.4.3	Harga Listrik (<i>Levelized Cost of Electricity</i> /LCOE)	94
12.4.4	Perbandingan dengan Konteks Indonesia	95
BAB XIII	TEKNOLOGI DEKOMISIONING DAN PENGELOLAAN LIMBAH JANGKA PANJANG	97
13.1	Metode Dekomisioning PLTN	97
13.1.1	<i>SAFSTOR (Safe Storage)</i> - Penyimpanan Aman	97
13.1.2	<i>DECON (Decontamination)</i> - Dekontaminasi Langsung	98
13.1.3	<i>ENTOMB (Entombment)</i> - Penyegelan Permanen	98
13.2	Penyimpanan Limbah Radioaktif Tingkat Tinggi	98
13.2.1	Penyimpanan Sementara (<i>Interim Storage</i>)	99
13.2.2	Penyimpanan Jangka Panjang - <i>Deep Geological Repository (DGR)</i>	99

13.3	Teknologi Transmutasi Limbah Nuklir	99
13.3.1	Reaktor Cepat (<i>Fast Reactors</i>) untuk Daur Ulang Limbah	99
13.3.2	Teknologi ADS (<i>Accelerator-Driven System</i>)	100
BAB XIV	TAHAPAN PEMBANGUNAN PLTN	101
14.1	Tahap Perencanaan dan Studi Kelayakan	101
14.2	Tahap Desain dan Perizinan	102
14.3	Tahap Konstruksi	102
14.4	Tahap Pengujian dan Komisioning	103
14.5	Tahap Operasi	103
14.6	Tahap <i>Decommissioning</i> (Penutupan dan Pembongkaran)	104
14.7	Tahap Pasca-Operasi	104
14.8	Faktor Penentu Keberhasilan Pembangunan PLTN	105
BAB XV	ISU DAN TANTANGAN PLTN DI INDONESIA	107
15.1	Isu dan Tantangan Teknis	107
15.2	Isu dan Tantangan Sosial	108
15.3	Isu dan Tantangan Ekonomi	109
15.4	Isu dan Tantangan Lingkungan	109
BAB XVI	MANAJEMEN MUTU DAN STANDART PENGELOLAAN PLTN	111
16.1	Prinsip Dasar ISO 55001	111
16.2	Penerapan ISO 55001 dalam Pengelolaan PLTN	112
16.3	Standar Terkait dalam Pengelolaan PLTN	113
16.4	Tantangan dalam Penerapan ISO 55001 untuk PLTN	114
16.5	Manfaat Penerapan ISO 55001 untuk PLTN	114
LAMPIRAN I	PERTANYAAN DAN JAWABAN MENGENAI PLTN	115
LAMPIRAN II	REFERENSI DAN BAHAN PENDALAMAN LANJUTAN	127
PENUTUP	133	
PROFIL PENYUSUN	135	



DAFTAR TABEL

Tabel 1	Perbandingan Fisi dan Fusii Nuklir	14
Tabel 2	Perbedaan Nuklir untuk PLTN dan Bom	19
Tabel 3	Perbandingan PWR vs BWR	24
Tabel 4	Perbandingan Reaktor Nuklir Berdasarkan Parameter Operasional	25
Tabel 5	Beberapa negara yang menggunakan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir	25
Tabel 6	Perbandingan Emisi	40
Tabel 7	Analisis Komparatif Risiko dan Dampak Berbagai Teknologi Pembangkit Listrik	49
Tabel 8	Perbedaan <i>startup</i> PLTN dan PLTU fosil	69
Tabel 9	Perbedaan sambungan paralel ke jaringan listrik	69
Tabel 10	Perbedaan operasi beban PLTN dan PLTU fosil	69
Tabel 11	Perbedaan <i>shutdown</i> PLTN dan PLTU fosil	69
Tabel 12	Keselamatan dan dampak lingkungan PLTN dan PLTU fosil	70
Tabel 13	Skema prioritas pekerjaan pemeliharaan PLTN	75
Tabel 14	Daftar Peralatan PLTN berdasarkan <i>Maintenance Prioritization Index</i>	77
Tabel 15	Perbandingan Emisi Karbon	80
Tabel 16	Mode Pembebanan Operasi PLTN	81
Tabel 17	Biaya Siklus Hidup PLTN	91
Tabel 18	Perbandingan LCOE beberapa sumber energi di dunia	91
Tabel 19	Biaya Pembangunan	93
Tabel 20	Biaya Operasi dan Pemeliharaan	94
Tabel 21	Biaya rata-rata untuk menghasilkan listrik melalui PLTN	94
Tabel 22	Penyimpanan Jangka Panjang Limbah Radioaktif	99



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Perkembangan PLTN di Dunia	1
Gambar 2	Perbandingan kerapangan energi	9
Gambar 3	Reaksi berantai nuklir. Sumber https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_chain_reaction	11
Gambar 4	Reaksi fisi nuklir. Sumber: https://id.wikipedia.org/wiki/Fusi_nuklir	13
Gambar 5	Reaksi Fusi versus Fisi Nuklir. Sumber: https://mindthegraph.com/blog/nuclear-fusion/	14
Gambar 6	Siklus bahan bakar nuklir. Sumber: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fuel_cycle2	17
Gambar 7	Perbedaan PLTN dan Bom Atom	20
Gambar 8	Bagan Powerplant Nuklir. Sumber: https://www.clipartmax.com/middle/m2H7Z5m2d3b1Z5A0_pwr-nuclear-power-plant-diagram-pwr-nuclear-power-plant-diagram/	22
Gambar 9	PLTN boiling water type. Sumber: https://id.m.wikipedia.org/wiki/Berkas:BWR_nuclear_power_plant_diagram.svg	24
Gambar 10	Siklus bahan bakar nuklir. Sumber: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fuel_cycle	30
Gambar 11	Pembentukan dan Penyimpanan Bahan Bakar Sumber gambar dan informasi: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/39/Spent_Fuel_Storage	34
Gambar 12	Prinsip Keselamatan PLTN. Sumber: https://www.nuclear-power.com/wp-content/uploads/2021/05/nuclear-safety-defence-in-depth.png	39
Gambar 13	Generasi PLTN. Sumber: https://www.researchgate.net/figure/Generations-of-nuclear-reactors-1_fig2_340514793	55



PENDAHULUAN

Latar Belakang dan Tujuan

RUPTL 2025-2034 menekankan pentingnya transformasi menuju sistem energi rendah karbon. Energi terbarukan seperti surya dan angin berkembang pesat, namun tantangan intermitensinya membuat Indonesia membutuhkan sumber energi *baseload* yang kuat dan bersih. PLTN menjadi salah satu opsi yang kini masuk dalam kajian strategis nasional.

Namun, di Indonesia pemahaman masyarakat tentang energi nuklir masih beragam. Banyak kekhawatiran muncul akibat keterbatasan informasi, sementara teknologi PLTN modern sudah berkembang jauh lebih aman dibanding generasi sebelumnya. IAEA menegaskan bahwa negara yang mempertimbangkan PLTN harus memulai dari peningkatan *awareness* publik dan SDM. Tanpa pemahaman yang cukup, sulit mengawali proses pengambilan keputusan yang tepat.

Dalam konteks kebijakan energi dan kebutuhan nasional itulah buku ini hadir sebagai bagian dari upaya membangun literasi nuklir yang selaras dengan arah RUPTL. Ia menjadi bagian dari upaya sistematis untuk mendukung program edukasi dan peningkatan literasi nuklir yang dikoordinasikan bersama berbagai lembaga, termasuk program kursus 1 hari *awareness* PLTN dan program berkelanjutan satu tahun yang dirancang untuk generasi muda. Dengan demikian, kehadiran buku ini tidak hanya melengkapi literatur, tetapi mengisi kebutuhan mendesak dalam pembangunan kapasitas nasional di bidang nuklir.

Tujuan utama penyusunan buku ini adalah memperkenalkan energi nuklir kepada pembaca dengan cara yang ringkas, jernih, dan dapat dipahami oleh siapa pun. Buku ini berusaha membangun pondasi pemahaman mengenai apa itu energi nuklir, bagaimana reaktor bekerja, dan bagaimana keselamatan dijamin melalui

standar internasional. Dengan membangun pemahaman tersebut, pembaca diharapkan mampu menilai isu nuklir secara lebih objektif, bebas dari mitos, dan berdasarkan informasi ilmiah. Buku ini membantu membangun kepercayaan bahwa teknologi nuklir terus berkembang dan dirancang dengan prinsip keselamatan sebagai prioritas utama.

Buku ini juga mendukung upaya lebih besar dalam literasi untuk mendukung sumber daya manusia Indonesia agar mampu mengikuti perkembangan teknologi nuklir global. Pemahaman awal yang diberikan dalam buku ini menjadi pijakan penting sebelum pembaca melangkah ke tingkat pembelajaran yang lebih tinggi melalui pelatihan, kursus, atau studi akademik di bidang teknologi nuklir.

Isi buku ini disusun secara bertahap, dimulai dari gambaran umum tentang energi nuklir dan peranannya dalam sistem energi dunia. Pembaca kemudian diajak menyelami dasar-dasar reaksi nuklir, fisi, dan komponen penting yang membentuk sebuah reaktor. Setelah itu, buku ini mengulas bagaimana PLTN dirancang dan dioperasikan, serta bagaimana setiap aspek keselamatan diatur melalui standar dan praktik terbaik internasional.

Pembahasan tidak berhenti pada teknologi inti. Buku ini juga membawa pembaca pada pemahaman mengenai siklus bahan bakar nuklir, pengelolaan limbah radioaktif, dan proses operasi serta pemeliharaan PLTN yang memastikan keandalan dan keamanan pembangkit sepanjang umur operasinya. Pada bagian berikutnya, buku ini menyajikan pembahasan mengenai aspek ekonomi, kebijakan energi, dan peluang penerapan PLTN di Indonesia, lengkap dengan tantangan yang mungkin muncul.

Bagian akhir dari buku ini mengupas teknologi nuklir masa depan seperti *Small Modular Reactor* (SMR) dan reaktor Generasi IV, yang menawarkan fleksibilitas dan keselamatan lebih tinggi. Ditutup dengan kumpulan pertanyaan dan jawaban populer, buku ini berusaha menjawab kegelisahan dan rasa ingin tahu masyarakat mengenai energi nuklir secara lugas namun tetap ilmiah.

Pentingnya Awareness dalam Pengembangan Energi Nuklir

Sebelum memahami teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), penting bagi kita untuk membangun kesadaran yang utuh tentang sejarah panjang energi nuklir. Kesadaran ini bukan hanya tentang fakta ilmiah, tetapi juga tentang bagaimana energi nuklir telah memengaruhi peradaban manusia, mulai dari penemuan ilmiah, pemanfaatan untuk perdamaian hingga pembelajaran dari insiden yang pernah terjadi. Di Indonesia, di mana wacana PLTN mulai mengemuka dalam kebijakan energi nasional, pemahaman sejarah ini menjadi fondasi untuk membangun literasi nuklir yang objektif, bebas dari mitos, dan berbasis ilmu pengetahuan.

Sejarah Penemuan Reaksi Nuklir Dan Perkembangan PLTN Pertama

Energi nuklir bermula dari penelitian tentang radioaktivitas pada akhir abad ke-19. Pada tahun 1896, Henri Becquerel menemukan fenomena radioaktivitas, yang kemudian dikembangkan oleh Marie dan Pierre Curie melalui penemuan unsur radioaktif seperti polonium dan radium.

Titik balik terjadi pada tahun 1938, ketika Otto Hahn dan Fritz Strassmann berhasil mendemonstrasikan reaksi fisi nuklir, di mana inti uranium-235 terbelah dan melepaskan energi besar. Penemuan ini menjadi dasar bagi pengembangan reaktor nuklir pertama di dunia, Chicago Pile-1, yang dioperasikan oleh Enrico Fermi pada 2 Desember 1942.

Dari sana, energi nuklir mulai dimanfaatkan untuk tujuan damai. PLTN pertama yang terhubung ke jaringan listrik adalah PLTN Obninsk di Uni Soviet (1954), diikuti oleh Calder Hall di Inggris (1956) dan Shippingport di Amerika Serikat (1957). Inilah awal mula era komersialisasi PLTN yang kemudian berkembang pesat pada 1970-1980-an, terutama di Prancis, Jepang, Jerman, dan Amerika Serikat.

Belajar dari insiden: membangun budaya keselamatan nuklir

Sejarah energi nuklir tidak lepas dari insiden yang memberikan pelajaran berharga tentang keselamatan. Tiga insiden besar yang sering dijadikan referensi adalah:

1. Three Mile Island (1979) – kegagalan sistem pendingin akibat *human error*.
2. Chernobyl (1986) – desain reaktor yang tidak aman dan prosedur operasional yang lemah.
3. Fukushima (2011) – kegagalan sistem pendingin akibat gempa dan tsunami.

Dari setiap insiden, standar keselamatan ditingkatkan, sistem pengawasan diperketat, dan budaya keselamatan nuklir (*nuclear safety culture*) dikembangkan secara global. Hal ini menjadi pembelajaran penting bagi Indonesia: bahwa keselamatan harus menjadi prioritas utama, dan kesiapan menghadapi risiko harus dibangun sejak dini.

Inspirasi Dari Jepang: Dari Tragedi Menjadi Pemimpin Energi Nuklir

Jepang adalah negara yang memiliki sejarah unik dan inspiratif dalam hal energi nuklir. Sebagai satu-satunya negara di dunia yang pernah mengalami serangan bom nuklir (Hiroshima dan Nagasaki pada tahun 1945), Jepang seharusnya menjadi negara yang paling trauma terhadap teknologi nuklir. Namun, justru sebaliknya, Jepang bangkit dari tragedi tersebut dan menjadi salah satu negara terdepan dalam pemanfaatan energi nuklir untuk tujuan damai, khususnya dalam pembangkitan listrik.

Transformasi dari Tragedi ke Kemajuan, Setelah Perang Dunia II, Jepang menghadapi tantangan besar dalam membangun kembali negaranya. Keterbatasan sumber daya alam, terutama bahan bakar fosil, mendorong Jepang untuk mencari alternatif energi yang lebih efisien dan berkelanjutan. Energi nuklir dipilih sebagai solusi strategis karena kepadatannya yang tinggi dan potensinya untuk mengurangi ketergantungan pada impor energi.

Pada tahun 1966, Jepang mengoperasikan PLTN pertamanya, **Tokai-1**, yang menggunakan teknologi reaktor gas-grafit. Sejak itu, Jepang terus mengembangkan teknologi nuklirnya dan menjadi salah satu negara dengan jumlah reaktor nuklir terbanyak di dunia. Pada puncaknya, PLTN menyumbang sekitar **30%** dari total pasokan listrik nasional Jepang, menjadikan energi nuklir sebagai tulang punggung ketahanan energi negara tersebut.

Tidak hanya memanfaatkan energi nuklir untuk kebutuhan dalam negeri, Jepang juga menjadi salah satu produsen terkemuka teknologi PLTN di dunia. Perusahaan-perusahaan Jepang seperti **Mitsubishi Heavy Industries (MHI)**, **Toshiba**, dan **Hitachi** telah mengembangkan reaktor nuklir canggih yang dieksport ke berbagai negara. Beberapa contoh teknologi PLTN buatan Jepang yang terkenal adalah:

- **Reaktor Air Ringan (LWR):** Reaktor jenis ini banyak digunakan di seluruh dunia karena keandalannya dan efisiensinya.
- **Reaktor Generasi III+:** Seperti AP1000 (kerjasama dengan Westinghouse) dan ABWR (*Advanced Boiling Water Reactor*), yang menawarkan peningkatan keselamatan dan efisiensi.
- **Reaktor Modular Kecil (SMR):** Jepang juga aktif dalam pengembangan reaktor kecil yang lebih fleksibel dan cocok untuk daerah terpencil.

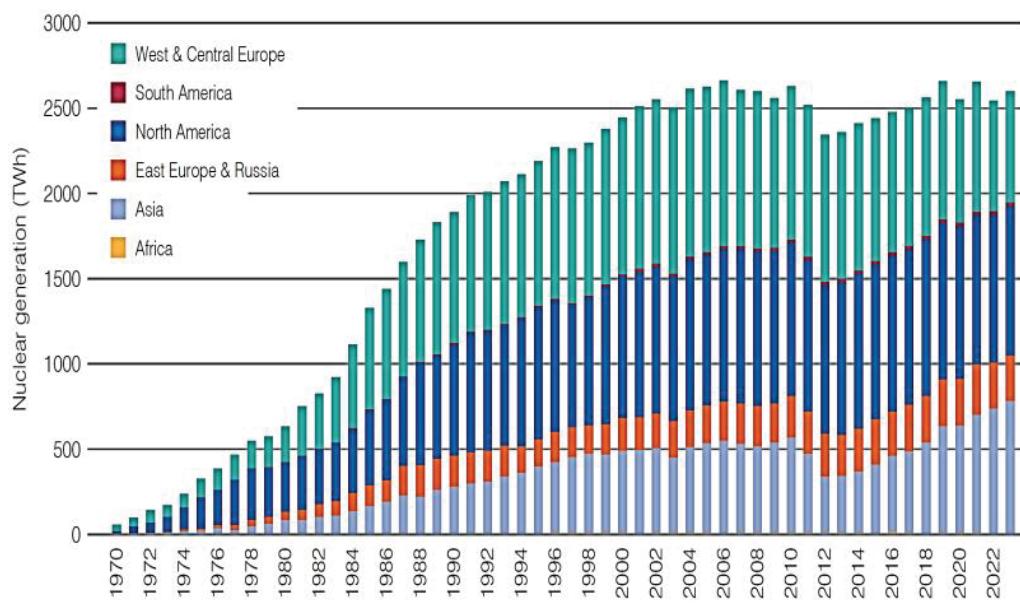
Jepang tidak hanya menjual teknologi, tetapi juga memberikan pelatihan, dukungan teknis, dan layanan pasca-penjualan kepada negara-negara yang membeli PLTN dari mereka. Hal ini menjadikan Jepang sebagai mitra strategis dalam pengembangan energi nuklir global.

Inspirasi Untuk Indonesia

Kisah Jepang bisa memberikan inspirasi bagi Indonesia, yang saat ini sedang mempertimbangkan untuk mengembangkan energi nuklir sebagai bagian dari bauran energi nasional. Beberapa pelajaran yang dapat diambil dari Jepang antara lain:

- **Ketangguhan dan Inovasi:** Jepang menunjukkan bahwa dengan ketangguhan dan inovasi, negara yang pernah mengalami tragedi nuklir dapat bangkit dan memanfaatkan teknologi nuklir untuk kesejahteraan rakyatnya.

- **Pentingnya Pendidikan dan Riset:** Jepang menginvestasikan banyak sumber daya dalam pendidikan dan penelitian nuklir, menghasilkan tenaga ahli dan teknologi yang kompetitif di tingkat global.
- **Keselamatan sebagai Prioritas Utama:** Jepang membuktikan bahwa dengan standar keselamatan yang ketat dan manajemen risiko yang baik, energi nuklir dapat menjadi sumber energi yang aman dan andal.



Source: World Nuclear Association and IAEA Power Reactor Information Service (PRIS)

Gambar 1. Perkembangan PLTN di Dunia

Negara Berkembang yang Berupaya dan Memiliki PLTN

Tidak hanya negara maju, beberapa negara berkembang juga telah sukses mengintegrasikan PLTN dalam sistem energi mereka, seperti India, Tiongkok, Pakistan, Brasil, dan Bangladesh. Mereka membuktikan bahwa dengan perencanaan matang, dukungan regulasi, dan pengembangan SDM, PLTN dapat menjadi solusi energi yang andal dan rendah emisi.

Indonesia memiliki potensi serupa. Dengan cadangan thorium yang melimpah dan kebutuhan energi yang terus tumbuh, PLTN bisa menjadi bagian dari strategi ketahanan energi nasional. Namun, langkah pertama yang harus dilakukan adalah **membangun kesadaran dan literasi nuklir di tingkat masyarakat, akademisi, dan pembuat kebijakan**.

Sejarah perkembangan energi nuklir mencerminkan perjalanan panjang dari penemuan ilmiah hingga penerapannya dalam industri. Meskipun telah terjadi kecelakaan besar, pembelajaran dari insiden masa lalu telah memperbaiki standar keselamatan dan meningkatkan keandalan teknologi nuklir.

Dengan inovasi terbaru seperti **reaktor modular kecil (Small Modular Reactors – SMR)** dan teknologi reaktor generasi keempat, industri nuklir terus berkembang untuk menyediakan energi yang lebih aman, efisien, dan berkelanjutan di masa depan.

Meskipun Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) sering dikaitkan dengan negara-negara maju, beberapa negara berkembang juga telah mengambil langkah besar dalam mengembangkan energi nuklir untuk memenuhi kebutuhan energi mereka. Berikut adalah beberapa negara berkembang yang telah berupaya dan berhasil mengoperasikan PLTN, atau sedang dalam proses membangun infrastruktur nuklir:

1. India

India adalah salah satu negara berkembang yang paling aktif dalam pengembangan energi nuklir. Dengan populasi yang besar dan pertumbuhan ekonomi yang pesat, India membutuhkan pasokan energi yang stabil dan berkelanjutan. Saat ini, India memiliki **22 reaktor nuklir yang beroperasi** dan beberapa lagi sedang dalam tahap pembangunan.

Kontribusi PLTN: PLTN menyumbang sekitar **3%** dari **total produksi listrik nasional India**, dan pemerintah berencana meningkatkan porsi ini menjadi **25%** pada tahun **2050**.

Teknologi: India mengembangkan reaktor nuklir domestik, seperti **Reaktor Air Berat Tekan (PHWR)**, dan juga bekerja sama dengan negara lain untuk mengimpor teknologi reaktor canggih.

Keunikan: India memiliki program nuklir tiga tahap yang unik, yang mencakup pemanfaatan thorium sebagai bahan bakar nuklir di masa depan.

2. China

Meskipun China sering dianggap sebagai negara maju dalam beberapa aspek, dalam konteks energi nuklir, China masih dikategorikan sebagai negara berkembang karena upayanya yang masif untuk membangun infrastruktur nuklir dalam beberapa dekade terakhir. China saat ini adalah **pemimpin global** dalam pembangunan PLTN baru.

Kontribusi PLTN: China memiliki **55 reaktor nuklir yang beroperasi** dan lebih dari **20 reaktor sedang dibangun**. PLTN menyumbang sekitar **5%** dari **total produksi listrik nasional**, dan pemerintah berencana meningkatkan porsi ini secara signifikan.

Teknologi: China mengembangkan reaktor generasi III seperti **Hualong One**, yang dieksport ke negara lain, termasuk Pakistan.

Target: China berencana menjadi pemimpin global dalam energi nuklir dengan target kapasitas PLTN sebesar **200 GW** pada tahun 2035.

3. Pakistan

Pakistan adalah negara berkembang lain yang telah mengoperasikan PLTN untuk memenuhi kebutuhan energinya. Pakistan menghadapi tantangan besar dalam pasokan energi, dan PLTN menjadi salah satu solusi untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.

Kontribusi PLTN: Pakistan memiliki **6 reaktor nuklir yang beroperasi**, yang menyumbang sekitar **8%** dari total produksi listrik nasional.

Kerjasama Internasional: Pakistan bekerja sama dengan China untuk membangun reaktor nuklir baru, seperti **Chashma Nuclear Power Plant** dan **Karachi Coastal Power Plant**.

Tantangan: Pakistan menghadapi tantangan dalam hal keamanan energi dan keselamatan nuklir, tetapi terus berupaya meningkatkan kapasitas PLTN-nya.

4. Iran

Iran adalah salah satu negara Timur Tengah yang telah mengembangkan PLTN untuk diversifikasi sumber energinya. Meskipun menghadapi sanksi internasional, Iran berhasil mengoperasikan PLTN pertamanya dengan bantuan Rusia.

PLTN Bushehr: PLTN pertama Iran, **Bushehr-1**, mulai beroperasi pada tahun 2011 dengan bantuan teknologi Rusia. PLTN ini memiliki kapasitas 1.000 MW.

Rencana Masa Depan: Iran berencana membangun lebih banyak reaktor nuklir untuk mengurangi ketergantungan pada minyak dan gas.

5. Argentina

Argentina adalah salah satu negara Amerika Latin yang telah lama mengembangkan energi nuklir. Negara ini memiliki tiga reaktor nuklir yang beroperasi dan sedang mengembangkan reaktor modular kecil (SMR) sebagai bagian dari strategi energi nasionalnya.

Kontribusi PLTN: PLTN menyumbang sekitar **5%** dari total produksi listrik Argentina.

Inovasi: Argentina mengembangkan **CAREM**, reaktor modular kecil pertama di dunia yang dirancang untuk daerah terpencil dan aplikasi industri.

6. Brasil

Brasil adalah negara berkembang lain yang memanfaatkan energi nuklir untuk diversifikasi sumber energinya. Brasil memiliki dua reaktor nuklir yang beroperasi dan sedang merencanakan pembangunan reaktor baru.

PLTN Angra: PLTN Angra-1 dan Angra-2 menyumbang sekitar 3% dari total produksi listrik Brasil.

Potensi Thorium: Brasil memiliki cadangan thorium yang besar, yang dapat digunakan sebagai bahan bakar nuklir di masa depan.

7. Bangladesh

Bangladesh adalah contoh negara berkembang yang sedang dalam proses membangun PLTN pertamanya. Dengan bantuan Rusia, Bangladesh sedang membangun **PLTN Rooppur**, yang diharapkan dapat mulai beroperasi pada tahun 2024.

Proyek Rooppur: PLTN ini akan memiliki dua reaktor dengan kapasitas total 2.400 MW.

Tujuan: PLTN ini diharapkan dapat membantu Bangladesh memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat seiring dengan pertumbuhan ekonomi.

8. Turki

Turki sedang berupaya membangun PLTN pertamanya. Dengan bantuan Rusia, Turki sedang membangun **PLTN Akkuyu**, yang diharapkan dapat mulai beroperasi pada tahun 2025.

Proyek Akkuyu: PLTN ini akan memiliki empat reaktor dengan kapasitas total 4.800 MW.

Tujuan: PLTN ini diharapkan dapat mengurangi ketergantungan Turki pada impor energi.

Dengan pemahaman sejarah ini, kita tidak hanya melihat energi nuklir sebagai sekadar teknologi, tetapi sebagai bagian dari dinamika global yang penuh pembelajaran.

01

DASAR-DASAR ENERGI NUKLIR

Energi nuklir adalah energi yang dilepaskan dari reaksi inti atom, baik melalui **fisi** (pembelahan inti berat) maupun **fusi** (penggabungan inti ringan). Sejarah energi nuklir dimulai pada tahun 1938 ketika Otto Hahn dan Fritz Strassmann menemukan reaksi fisi uranium. Pada tahun 1954, PLTN komersial pertama di dunia mulai beroperasi di Obninsk, Uni Soviet, menandai awal era pemanfaatan energi nuklir untuk pembangkit listrik.

Perbedaan Utama dengan Sumber Energi Lain:

- **Energi Fosil:** Bergantung pada pembakaran bahan organik, menghasilkan CO₂ dan polutan.
- **Energi Terbarukan (angin, surya):** Bergantung pada kondisi alam, memerlukan penyimpanan energi.
- **Energi Nuklir:** Berbasis reaksi inti atom, menghasilkan energi padat (1 kg uranium-235 setara dengan 3 juta kg batubara).



Gambar 2. Perbandingan kerapangan energi

1.1. Fisika Nuklir Dasar

Setiap benda di dunia ini tersusun dari atom. Atom adalah bagian terkecil dari suatu materi yang masih memiliki sifat-sifat kimiawi. Atom terdiri dari tiga bagian utama:

1. Inti Atom (Nukleus):

- Terletak di tengah atom.
- Terdiri dari dua partikel:
 - a. **Proton:** Partikel bermuatan positif (+1).
 - b. **Neutron:** Partikel tidak bermuatan (netral).
- Inti atom sangat kecil tetapi padat, karena mengandung hampir seluruh massa atom.

2. Elektron:

- Partikel bermuatan negatif yang bergerak mengelilingi inti atom.
- Elektron sangat ringan dan berada di luar inti, membentuk "awan" yang disebut kulit elektron.

Contoh Sederhana: Bayangkan atom seperti tata surya mini. Inti atom adalah matahari, dan elektron adalah planet-planet yang mengelilinginya.

1.2. Reaksi Nuklir

Reaksi nuklir adalah proses di mana inti atom atau partikel nuklir saling bertabrakan dan menghasilkan sesuatu yang baru. Ini berbeda dengan reaksi kimia biasa (seperti pembakaran) karena melibatkan perubahan pada inti atom, bukan hanya elektron. Ada dua jenis reaksi nuklir utama yaitu Fisi Nuklir dan Fusi Nuklir.

1.2.1. Fisi Nuklir

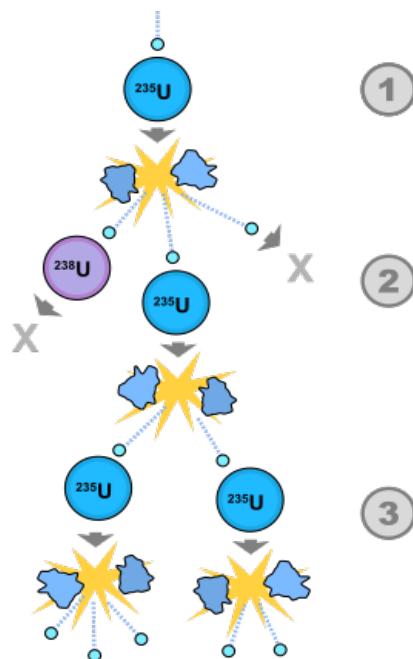
Fisi nuklir adalah proses di mana inti atom berat terbelah menjadi dua atau lebih inti yang lebih kecil, disertai pelepasan energi dalam jumlah besar. Proses ini terjadi ketika inti atom berat seperti uranium-235 (U-235) atau plutonium-239 (Pu-239) menyerap neutron, menjadi tidak stabil, dan akhirnya terbelah.

Mekanisme Fisi Nuklir:

1. **Penyerapan Neutron:** Inti atom berat (misalnya U-235) menyerap neutron, menjadi U-236 yang sangat tidak stabil.
2. **Pembelahan Inti:** Inti yang tidak stabil terbelah menjadi dua inti yang lebih

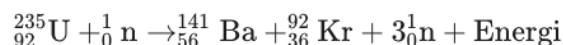
kecil (disebut *fission products*), seperti kripton dan barium, serta melepaskan 2-3 neutron baru.

3. **Pelepasan Energi:** Proses ini melepaskan energi dalam bentuk panas dan radiasi. Energi yang dihasilkan berasal dari perbedaan massa antara bahan awal dan produk fisi (mengikuti persamaan Einstein, $E=mc^2$).
4. **Reaksi Berantai:** Neutron yang dilepaskan dapat menabrak inti atom berat lainnya, memicu fisi baru dan menciptakan reaksi berantai yang terus berlanjut.



Gambar 3. Reaksi berantai nuklir.
Sumber https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_chain_reaction

Contoh Reaksi Fisi Uranium-235:



Aplikasi Fisi Nuklir:

- **Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir:** Reaksi fisi terkendali digunakan untuk menghasilkan panas, yang kemudian mengubah air menjadi uap dan menggerakkan turbin pembangkit listrik.

- Senjata Nuklir: Reaksi fisi tak terkendali digunakan dalam bom atom, seperti yang dijatuhkan di Hiroshima dan Nagasaki.

Keuntungan Fisi Nuklir:

- Menghasilkan energi dalam jumlah besar dengan bahan bakar yang relatif sedikit.
- Tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca selama operasi normal.

Tantangan Fisi Nuklir:

- Menghasilkan limbah radioaktif yang berbahaya dan memerlukan penyimpanan jangka panjang.
- Risiko kecelakaan nuklir, seperti yang terjadi di Chernobyl (1986) dan Fukushima (2011).

1.2.2. Fusi Nuklir

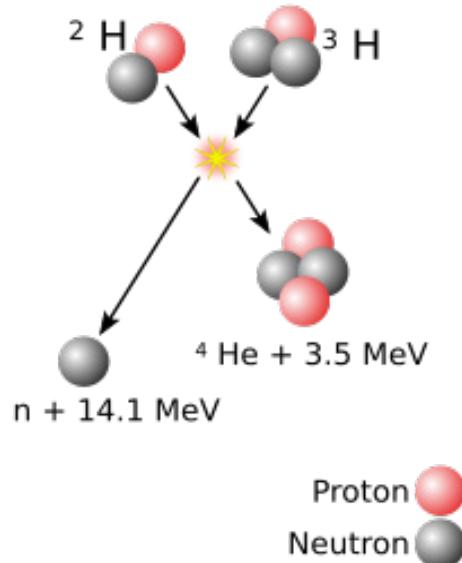
Fusi nuklir adalah proses di mana dua inti atom ringan bergabung membentuk inti yang lebih berat, disertai pelepasan energi yang sangat besar. Proses ini adalah sumber energi bintang, termasuk matahari.

Mekanisme Fusi Nuklir:

1. **Pendekatan Inti Atom:** Dua inti atom ringan (seperti deuterium dan tritium, isotop hidrogen) harus mendekati satu sama lain pada jarak yang sangat dekat untuk mengatasi gaya tolak-menolak elektrostatik (gaya Coulomb). Proses ini memerlukan pemanasan pada temperatur yang sangat tinggi.
2. **Penggabungan Inti:** Ketika inti atom bergabung, sebagian massa mereka diubah menjadi energi (mengikuti persamaan $E=mc^2$).
3. **Pelepasan Energi:** Energi yang dihasilkan jauh lebih besar daripada energi yang dihasilkan oleh fisi nuklir.

Contoh Reaksi Fusi Deuterium-Tritium:





Gambar 4 Reaksi fisi nuklir.

Sumber: https://id.wikipedia.org/wiki/Fusi_nuklir

Aplikasi Fusi Nuklir:

- **Sumber Energi Bintang:** Fusi nuklir adalah proses yang menggerakkan matahari dan bintang-bintang lainnya.
- **Penelitian Energi Bersih:** Fusi nuklir dianggap sebagai sumber energi masa depan karena potensinya yang besar dan dampak lingkungan yang minimal.

Keuntungan Fusi Nuklir:

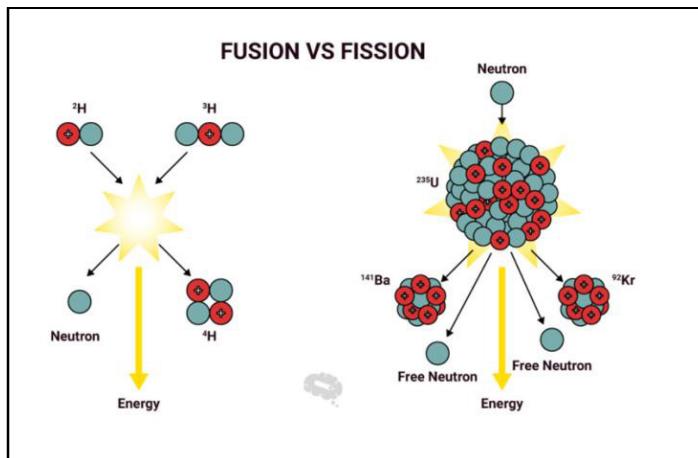
- Bahan bakarnya melimpah (*deuterium* dapat diekstrak dari air laut, dan *tritium* dapat dihasilkan dari *litium*).
- Tidak menghasilkan limbah radioaktif berbahaya dalam jangka panjang.
- Tidak ada risiko reaksi berantai tak terkendali seperti pada fisi nuklir.

Tantangan Fusi Nuklir:

- Membutuhkan suhu dan tekanan yang sangat tinggi (jutaan derajat Celsius) untuk memulai reaksi fusi.
- Teknologi untuk menciptakan dan mempertahankan kondisi fusi masih dalam tahap pengembangan.
- Proyek penelitian seperti *ITER* (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) sedang berupaya mewujudkan fusi nuklir yang layak secara komersial.

Tabel 1. Perbandingan Fisi dan Fusi Nuklir

Aspek	Fisi Nuklir	Fusi Nuklir
Bahan Bakar	Uranium-235, Plutonium-239	Deuterium, Tritium, Lithium
Energi yang Dihasilkan	Besar, tetapi lebih kecil dari fusi	Sangat besar (4x lebih besar dari fisi)
Limbah Radioaktif	Menghasilkan limbah radioaktif berbahaya	Limbah radioaktif minimal dan berumur pendek
Kondisi Reaksi	Dapat terjadi pada suhu dan tekanan normal	Membutuhkan suhu dan tekanan sangat tinggi
Aplikasi Saat Ini	Pembangkit listrik, senjata nuklir	Masih dalam tahap penelitian



Gambar 5. Reaksi Fusi versus Fisi Nuklir.

Sumber: <https://mindthegraph.com/blog/nuclear-fusion/>

1.3. Radioaktivitas

Radioaktivitas adalah proses di mana inti atom yang tidak stabil melepaskan energi dengan memancarkan partikel atau gelombang elektromagnetik. Proses ini terjadi secara alami pada isotop radioaktif seperti uranium-238, plutonium-239, dan lainnya. Radioaktivitas ditemukan pertama kali oleh Henri Becquerel pada tahun 1896, dan sejak itu, pemahaman tentang fenomena ini telah berkembang pesat.

Reaktor nuklir memiliki hubungan yang sangat erat dengan radioaktivitas alpha (α), beta (β), dan gamma (γ). Ketiga jenis radiasi ini dihasilkan selama proses reaksi

fisi nuklir dan peluruhan radioaktif dari bahan bakar nuklir serta produk fisi di dalam reaktor.

Jenis Radiasi yang Dipancarkan:

1. Partikel Alfa (α):

- Terdiri dari dua proton dan dua neutron (inti helium).
- Memiliki daya tembus rendah dan dapat dihentikan oleh selembar kertas atau kulit manusia.
- Berbahaya jika bahan radioaktif yang memancarkan partikel alfa terhirup atau tertelan.

2. Partikel Beta (β):

- Berupa elektron (β^-) atau positron (β^+) yang dipancarkan dari inti atom.
- Memiliki daya tembus lebih tinggi daripada partikel alfa, tetapi masih dapat dihentikan oleh lapisan logam tipis atau plastik tebal.
- Dapat menembus kulit dan menyebabkan kerusakan jaringan.

3. Sinar Gamma (γ):

- Gelombang elektromagnetik berenergi tinggi yang dipancarkan oleh inti atom.
- Memiliki daya tembus sangat tinggi dan memerlukan pelindung tebal seperti timbal atau beton untuk menghentikannya.
- Berpotensi menyebabkan kerusakan sel dan DNA jika terpapar dalam dosis tinggi.

Waktu Paruh (Half-Life):

- Waktu paruh adalah waktu yang dibutuhkan oleh suatu isotop radioaktif untuk kehilangan separuh aktivitas radioaktifnya melalui peluruhan.
- Setiap isotop radioaktif memiliki waktu paruh yang unik. Misalnya:
 - Uranium-235 memiliki waktu paruh 704 juta tahun.
 - Plutonium-239 memiliki waktu paruh 24.100 tahun.
 - Karbon-14, yang digunakan dalam penanggalan radiometri, memiliki waktu paruh 5.730 tahun.
- Waktu paruh membantu ilmuwan memprediksi stabilitas isotop dan dampak radioaktivitasnya terhadap lingkungan.

Aplikasi Radioaktivitas:

- **Energi Nuklir:** Isotop radioaktif seperti uranium-235 digunakan sebagai bahan bakar dalam reaktor nuklir.
- **Kedokteran:** Radioisotop digunakan dalam terapi kanker (misalnya, kobalt-60) dan pencitraan medis (misalnya, technetium-99m).
- **Industri:** Radioaktivitas digunakan dalam pengujian material, sterilisasi peralatan medis, dan pengukuran ketebalan material.
- **Pertanian:** Radiasi digunakan untuk meningkatkan mutu benih dan mengendalikan hama.

Dampak Radioaktivitas:

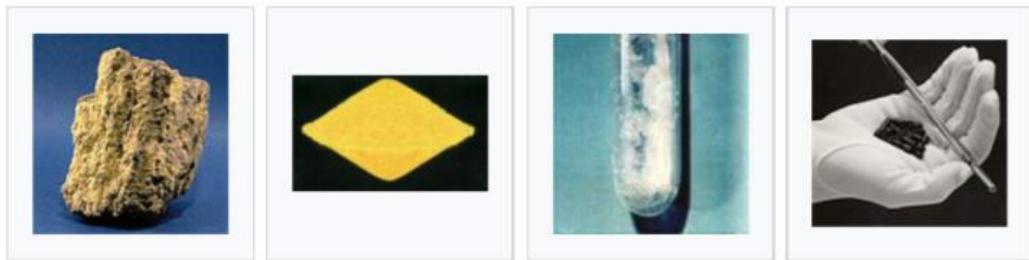
- **Lingkungan:** Limbah radioaktif dapat mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik.
- **Kesehatan:** Paparan radiasi dalam dosis tinggi dapat menyebabkan kerusakan sel, kanker, atau bahkan kematian.
- **Keamanan:** Penggunaan bahan radioaktif memerlukan pengawasan ketat untuk mencegah penyalahgunaan, seperti dalam pembuatan senjata nuklir.
- Dengan memahami radioaktivitas, kita dapat memanfaatkannya untuk kepentingan manusia sekaligus meminimalkan risikonya melalui pengelolaan yang tepat.

1.4. Bahan Bakar Nuklir Fisi

- **Uranium:** Logam berat yang ditemukan di kerak bumi. Hanya 0.7% uranium alami berupa isotop U-235 yang bisa digunakan untuk fisi.
- **Thorium:** Alternatif bahan bakar yang lebih melimpah, tetapi memerlukan reaktor khusus untuk mengonversinya menjadi uranium-233 yang fisil.

Proses Pengayaan Uranium

- **Penambangan:** Uranium ditambang dari deposit alam, biasanya dalam bentuk bijih uranium (U3O8).
- **Konversi:** Bijih diolah menjadi gas uranium heksafluorida (UF6).
- **Pengayaan:** Konsentrasi U-235 ditingkatkan dari 0.7% menjadi 3-5% menggunakan metode centrifuge atau difusi gas.
- **Fabrikasi Bahan Bakar:** Uranium yang diperkaya dibentuk menjadi pelet keramik (UO2) dan dimasukkan ke dalam tabung logam (bahan bakar reaktor).



1 Uranium ore – the principal raw material of nuclear fuel

2 Yellowcake – the form in which uranium is transported to a conversion plant

3 UF_6 – used in enrichment

4 Nuclear fuel – a compact, inert, insoluble solid

Gambar 6. Siklus bahan bakar nuklir.

Sumber: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fuel_cycle

1.5. Fisika Reaktor Nuklir (Dasar Teori)

Fisika reaktor nuklir adalah ilmu yang mempelajari bagaimana reaksi nuklir terjadi, dikendalikan, dan dimanfaatkan untuk menghasilkan energi. Pemahaman ini sangat penting agar reaktor nuklir dapat beroperasi dengan efisien, aman, dan terkendali.

Neutronik Reaktor: Moderasi, Difusi Neutron, dan Reaksi Berantai

Peran Neutron dalam Reaktor Nuklir:

Neutron adalah partikel netral yang sangat penting dalam reaktor nuklir. Mereka bertugas memicu reaksi fisi (pembelahan inti atom) dan menjaga reaksi berantai tetap berlangsung.

Moderasi Neutron:

- Neutron yang dihasilkan dari reaksi fisi memiliki energi tinggi (disebut neutron cepat).
- Agar neutron dapat lebih mudah diserap oleh inti bahan bakar (seperti uranium-235), mereka harus diperlambat menggunakan bahan yang disebut moderator.
- **Contoh moderator:** air ringan, air berat, atau grafit.
- Proses memperlambat neutron ini disebut moderasi neutron, dan hasilnya adalah neutron termal yang memiliki energi lebih rendah.

Difusi Neutron:

- Neutron yang terbentuk akan menyebar (berdifusi) di dalam reaktor sebelum akhirnya diserap oleh bahan bakar atau bahan lain.
- Penyebaran ini memengaruhi distribusi energi dan panas dalam reaktor.

Reaksi Berantai Nuklir

- Reaksi berantai terjadi ketika setiap fisi menghasilkan neutron baru yang cukup untuk memicu fisi berikutnya.
- Dalam reaktor nuklir, reaksi berantai ini harus terkendali agar energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan dengan aman.
- Jika reaksi berantai tidak terkendali (seperti dalam bom nuklir), energi yang dilepaskan akan sangat besar dan berbahaya.

Kritikalitas dan Mekanisme Pengendalian Reaksi Nuklir

Kritikalitas Reaktor:

Kritikalitas menggambarkan apakah jumlah neutron dalam reaktor stabil, berkurang, atau bertambah.

Ada tiga kondisi kritikalitas:

1. Subkritis ($keff < 1$): Jumlah neutron berkurang, reaksi melemah, dan reaktor tidak dapat menghasilkan daya.
2. Kritis ($keff = 1$): Jumlah neutron stabil, reaksi berlangsung normal, dan reaktor beroperasi dengan baik.
3. Superkritis ($keff > 1$): Jumlah neutron bertambah, reaksi meningkat, dan dapat berbahaya jika tidak dikendalikan.

Mekanisme Pengendalian Reaksi Nuklir

1. Batang Kendali (*Control Rods*):
 - Terbuat dari bahan penyerap neutron seperti boron atau kadmium.
 - Batang ini dimasukkan atau ditarik dari reaktor untuk mengontrol jumlah neutron dan mengatur kecepatan reaksi.
2. Pendingin Reaktor (*Coolant*): Media seperti air, natrium cair, atau gas helium digunakan untuk menyerap panas dari reaksi fisi dan menjaga suhu reaktor tetap stabil.
3. Moderator: Selain memperlambat neutron, moderator juga membantu menjaga reaksi fisi tetap stabil.

4. Sistem Darurat (SCRAM): Jika terjadi kondisi berbahaya, reaktor dapat dimatikan secara darurat dengan memasukkan batang kendali sepenuhnya ke dalam reaktor. Proses ini disebut SCRAM.

Fisika reaktor nuklir adalah ilmu yang kompleks tetapi sangat penting untuk memastikan reaktor nuklir beroperasi dengan aman dan efisien. Dengan memahami peran neutron, reaksi berantai, dan mekanisme pengendalian, kita dapat memanfaatkan energi nuklir untuk menghasilkan listrik tanpa menimbulkan risiko yang besar.

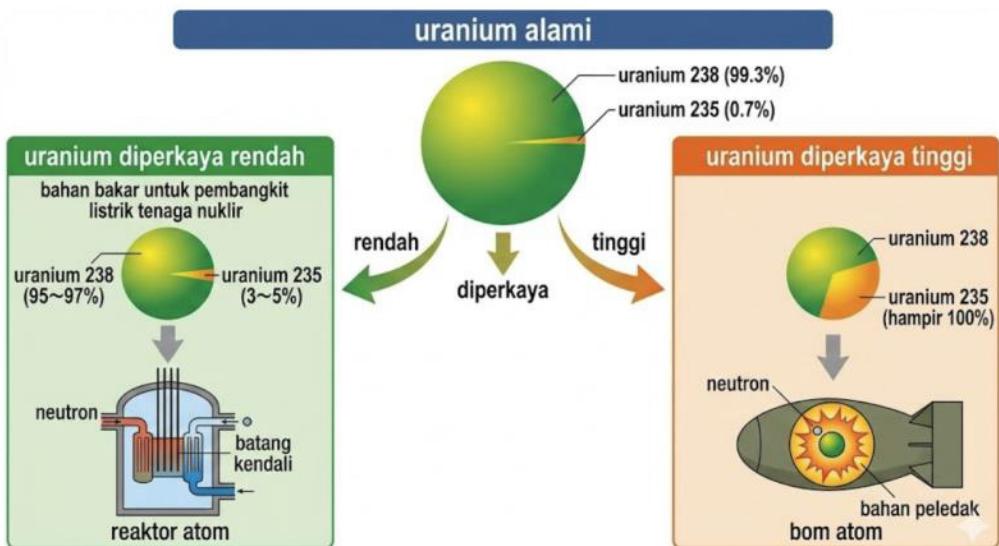
1.6. Perbedaan PLTN vs Bom Nuklir

Bayangkan energi nuklir seperti api. Api bisa digunakan untuk memasak makanan dan menghangatkan rumah, tetapi jika tidak dikendalikan, api juga bisa membakar habis segala sesuatu. Nah, Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) dan Bom Nuklir adalah dua cara berbeda dalam menggunakan energi nuklir, mirip seperti menggunakan api untuk hal yang baik atau hal yang merusak.

PLTN dan bom nuklir menggunakan energi nuklir, tetapi dengan cara yang sangat berbeda. PLTN dirancang untuk kebaikan manusia-menghasilkan listrik yang bersih dan efisien. Sementara itu, bom nuklir adalah senjata penghancur yang sangat berbahaya. Dengan memahami perbedaan ini, kita bisa melihat bahwa energi nuklir bisa menjadi teman atau musuh, tergantung bagaimana kita menggunakan.

Tabel 2. Perbedaan Nuklir untuk PLTN dan Bom

Aspek	PLTN	Bom Nuklir
Tujuan	Menghasilkan listrik	Menghancurkan dengan ledakan besar
Reaksi Nuklir	Terkendali	Tidak terkendali
Kontrol	Batang kendali, moderator, pendingin	Tidak ada kontrol
Energi	Dikeluarkan bertahap dan stabil	Dilepaskan sekaligus dalam ledakan
Dampak Lingkungan	Minimal jika dioperasikan dengan benar	Kerusakan masif dan radiasi berbahaya
Bahan Bakar	Uranium-235 (pengayaan rendah)	Uranium-235/plutonium-239 (pengayaan tinggi)



Gambar 7. Perbedaan PLTN dan Bom Atom

02

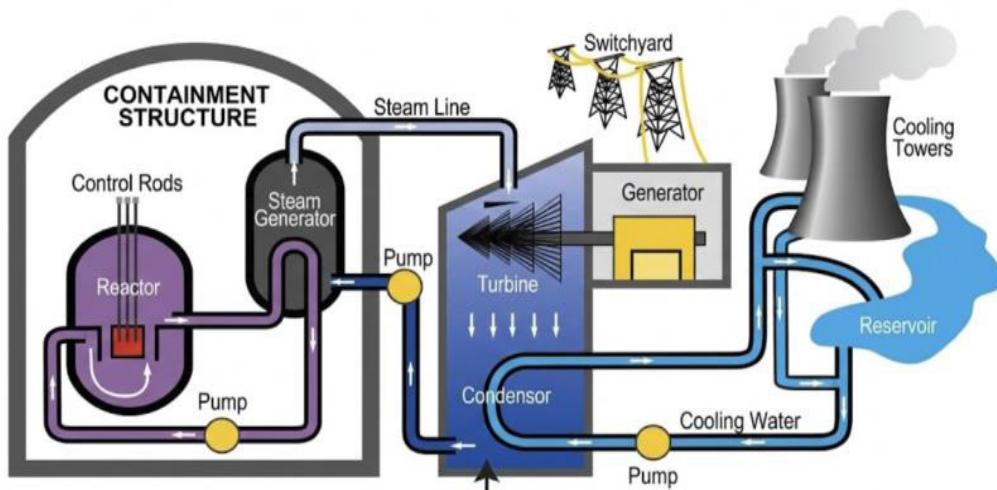
PRINSIP KERJA PLTN

2.1. Komponen Utama PLTN

PLTN dirancang untuk mengonversi energi panas dari reaksi fisi nuklir menjadi energi listrik. Komponen kritisnya meliputi:

- 1) Reaktor Nuklir
 - a) Inti Reaktor (*Core*): Berisi bahan bakar nuklir (biasanya pelet UO_2 dalam tabung zirkonium) dan batang kendali (*control rods*) yang terbuat dari boron atau kadmium untuk menyerap neutron dan mengatur reaksi berantai.
 - b) Moderator: Bahan yang memperlambat neutron cepat hasil fisi agar lebih mudah memicu fisi berikutnya (contoh: air ringan, air berat, atau grafit).
- 2) Sistem Pendingin
 - a) Pendingin Primer: Cairan atau gas yang mengalir melalui inti reaktor untuk menyerap panas (contoh: air bertekanan tinggi pada reaktor PWR atau sodium cair pada reaktor cepat).
 - b) Pompa Pendingin: Memastikan sirkulasi pendingin untuk mencegah *overheating*.
- 3) Pembangkit Uap (*Steam Generator*)
 - a) Pada reaktor air tekan (PWR), panas dari pendingin primer ditransfer ke air sekunder melalui penukar panas, menghasilkan uap kering untuk memutar turbin.
- 4) Turbin dan Generator
 - a) Turbin Uap: Uap bertekanan tinggi memutar sudu-sudu turbin, mengonversi energi panas menjadi energi mekanik.

- b) Generator Listrik: Terhubung ke turbin, mengubah energi mekanik menjadi listrik melalui induksi elektromagnetik (Hukum Faraday).
- 5) Kondenser dan Menara Pendingin
- Kondenser: Mendinginkan uap bekas turbin menjadi air untuk digunakan kembali.
 - Menara Pendingin: Membuang panas sisa ke atmosfer melalui penguapan air (terlihat sebagai "awan" uap air).



Gambar 8. Bagan Powerplant Nuklir.

Sumber: https://www.clipartmax.com/middle/m2H7Z5m2d3b1Z5A0_pwr-nuclear-power-plant-diagram-pwr-nuclear-power-plant-diagram/

2.2. Siklus Tenaga Nuklir

Proses konversi energi pada PLTN mengikuti prinsip termodinamika siklus Rankine:

1. Produksi Panas di Inti Reaktor
 - Reaksi fisi uranium-235 melepaskan panas ($\approx 300^\circ\text{C}$).
2. Transfer Panas ke Sistem Pendingin
 - Pendingin primer mengalir melalui inti reaktor, menyerap panas dan mentransfernya ke pembangkit uap.
3. Pembangkit Uap dan Turbin
 - Uap bertekanan tinggi (6-7 MPa) menggerakkan turbin dengan efisiensi $\approx 35\text{-}40\%$.

4. Kondensasi dan *Recycle Air*

- Uap bekas turbin didinginkan di kondenser menjadi air, lalu dipompa kembali ke pembangkit uap.

Perbandingan dengan PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap Batubara):

- PLTN tidak memerlukan pembakaran, sehingga tidak menghasilkan abu atau CO₂.
- Sumber panas PLTN jauh lebih padat: 1 pelet uranium (7 gram) setara energi dengan 1 ton batubara.

2.3. Jenis-Jenis Reaktor Nuklir

1. Reaktor Air Ringan (*Light Water Reactor*/LWR)

- Reaktor Air Tekan (*Pressurized Water Reactor*/PWR):
 - Pendingin dan moderator: air ringan bertekanan tinggi (15 MPa).
 - Uap diproduksi di steam generator terpisah.
 - Contoh: PLTN Three Mile Island (AS), Keban (Turki).
- Reaktor Air Didih (*Boiling Water Reactor*/BWR):
 - Air dalam reaktor didihkan langsung menjadi uap untuk memutar turbin.
 - Lebih sederhana daripada PWR, tetapi uap mengandung radioaktivitas rendah.
 - Contoh: PLTN Fukushima Daiichi (Jepang).

2. Reaktor Air Berat (*Heavy Water Reactor*/HWR)

- Moderator: air berat (D₂O) yang lebih efisien menyerap neutron.
- Bahan bakar: uranium alam (tidak perlu pengayaan).
- Contoh: Reaktor CANDU (Kanada-India).

3. Reaktor Cepat (*Fast Breeder Reactor*/FBR)

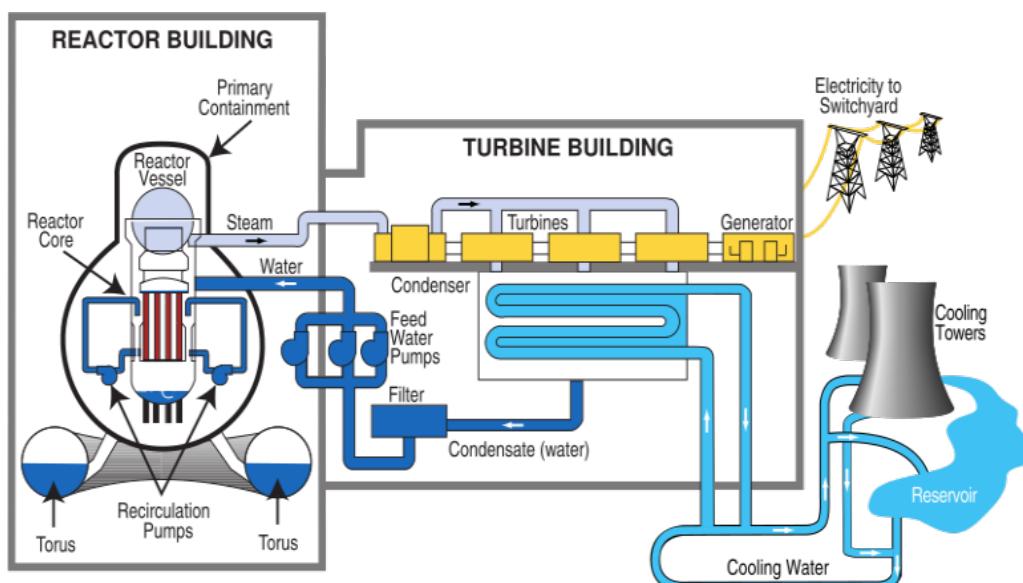
- Menggunakan neutron cepat tanpa moderator.
- Bahan bakar: campuran uranium dan plutonium (MOX).
- Keunggulan: Dapat menghasilkan lebih banyak bahan bakar fisil (plutonium-239) daripada yang dikonsumsi.
- Contoh: BN-800 (Rusia), Monju (Jepang, non-aktif).

4. Reaktor Suhu Tinggi (High-Temperature Gas-cooled Reactor/HTGR)

- Pendingin: gas helium.
- Moderator: grafit.
- Bekerja pada suhu hingga 700°C , cocok untuk produksi hidrogen.
- Contoh: HTR-PM (Tiongkok).

Tabel 3 Perbandingan PWR vs BWR

Parameter	PWR	BWR
Tekanan Reaktor	15-16 MPa	7-8 MPa
Uap Radioaktif	Tidak (terisolasi di sirkuit sekunder)	Ya (langsung ke turbin)
Efisiensi	$\approx 33\%$	$\approx 32\%$
Kompleksitas	Lebih kompleks	Lebih sederhana



Gambar 9. PLTN boiling water type.

Sumber: https://id.m.wikipedia.org/wiki/Berkas:BWR_nuclear_power_plant_diagram.svg

Dari gambar, tampak bahwa Air dipanaskan melalui pemecahan atom uranium yang terkontrol di inti reaktor dan berubah menjadi uap. Pompa mendorong air melalui reaktor dengan kecepatan maksimum, memaksimalkan produksi uap. Uap menggerakkan turbin yang memutar generator yang menghasilkan listrik. Air pendingin dari sungai mengembunkan uap kembali menjadi air. Air sungai tersebut kemudian dibuang langsung kembali ke sungai atau didinginkan di menara pendingin dan digunakan kembali di pembangkit listrik.

Tabel 4 Perbandingan Reaktor Nuklir Berdasarkan Parameter Operasional

Parameter	LWR (Light Water Reactor)	HWR (Heavy Water Reactor)	FBR (Fast Breeder Reactor)	HTGR (High-Temperature Gas-cooled Reactor)
Tekanan	15 MPa (PWR), 7-8 MPa (BWR)	10-12 MPa	0.1-0.5 MPa (sistem pendingin natrium)	5-7 MPa
Temperatur	300-325°C (PWR), 285°C (BWR)	250-300°C	500-550°C	700-950°C
Kompleksitas	Sedang (PWR lebih kompleks daripada BWR)	Sedang	Tinggi (memerlukan teknologi neutron cepat dan pendingin natrium)	Tinggi (teknologi suhu tinggi dan pendingin gas helium)
Sistem Pendingin	Air ringan (H_2O)	Air berat (D_2O)	Natrium cair	Gas helium
Uap Radioaktif	Tidak (PWR), Ya (BWR)	Tidak	Tidak	Tidak
Efisiensi	33-35% (PWR), 32-34% (BWR)	30-32%	40-45%	40-50%

Tabel 5 Beberapa negara yang menggunakan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir

Negara	Percentase Listrik dari Nuklir (%)	Jenis PLTN	Kapasitas Total (GW)	Tahun Operasi Pertama
Prancis	63%	PWR	61.4 GW	1956 (Chinon)
Amerika Serikat	18.2%	PWR, BWR	95.6 GW	1957 (Shippingport)
China	5.0%	PWR, HPR1000, FBR	58 GW	1991 (Qinshan)
Rusia	19.7%	PWR, RBMK, FBR	37.6 GW	1954 (Obninsk)
Jepang	7.2%	PWR, BWR	33 GW	1966 (Tokai)
Jerman	0% (pasca phase-out)	PWR, BWR	-	1969 (Obriegheim)
Korea Selatan	28%	PWR, PHWR	24.5 GW	1978 (Kori)
India	3.2%	PHWR, FBR	7.5 GW	1969 (Tarapur)
Inggris	14.7%	AGR	6.9 GW	1956 (Calder Hall)
Kanada	14.6%	CANDU (PHWR)	13.6 GW	1971 (Pickering)
Ukraina	51%	PWR, VVER	13.1 GW	1977 (Chernobyl)
Swedia	30%	BWR, PWR	6.9 GW	1964 (Oskarshamn)
Brasil	2.4%	PWR	1.9 GW	1985 (Angra)
Afrika Selatan	5.2%	PWR	1.8 GW	1984 (Koeberg)

Keterangan:

- **PWR (Pressurized Water Reactor):** Jenis reaktor nuklir yang paling umum digunakan di dunia.
- **BWR (Boiling Water Reactor):** Reaktor air didih yang digunakan di banyak negara.
- **PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor):** Teknologi khas Kanada dengan desain CANDU.
- **FBR (Fast Breeder Reactor):** Reaktor dengan efisiensi tinggi, digunakan di Rusia dan India.
- **RBMK:** Reaktor Soviet yang terkenal dengan insiden Chernobyl.
- **AGR (Advanced Gas-cooled Reactor):** Digunakan terutama di Inggris.
- **HPR1000:** Teknologi reaktor terbaru yang dikembangkan oleh China.

03

SIKLUS BAHAN BAKAR NUKLIR

Siklus bahan bakar nuklir adalah serangkaian proses yang mencakup penambangan, pengolahan, penggunaan, dan pengelolaan limbah bahan bakar nuklir. Siklus ini dimulai dari ekstraksi bahan baku (seperti uranium atau thorium) hingga pengelolaan bahan bakar bekas setelah digunakan di reaktor nuklir. Berikut adalah uraian lengkap tentang siklus bahan bakar nuklir, termasuk submateri dan alasannya:

3.1. Penambangan Uranium dan Thorium

Proses:

- Penambangan Uranium : Uranium biasanya ditemukan dalam bijih uranium, seperti uraninit atau pitchblende. Metode penambangan meliputi:
 - Penambangan Terbuka: Untuk deposit yang dekat dengan permukaan.
 - Penambangan Bawah Tanah: Untuk deposit yang lebih dalam.
 - *In-Situ Leaching* (ISL): Melarutkan uranium langsung dari bijih di dalam tanah menggunakan larutan kimia.
- Penambangan Thorium : Thorium ditemukan dalam mineral monasit, yang sering terkandung dalam pasir mineral. Proses penambangannya mirip dengan uranium, tetapi thorium belum banyak digunakan secara komersial dalam PLTN.

Tantangan:

- Lingkungan: Penambangan dapat menyebabkan kerusakan lingkungan, seperti erosi tanah dan pencemaran air.
- Ekonomi: Biaya penambangan tergantung pada kualitas bijih dan lokasi deposit.

3.2. Pengayaan Uranium, Fabrikasi Bahan Bakar, dan Reprocessing

Pengayaan Uranium:

- Uranium alam hanya mengandung sekitar 0,7% uranium-235 (U-235), yang dapat mengalami fisi. Untuk digunakan di reaktor nuklir, uranium perlu diperkaya hingga 3-5% U-235.
- Metode pengayaan:
 - Difusi Gas: Memisahkan isotop U-235 dan U-238 berdasarkan perbedaan massa.
 - Sentrifugasi Gas: Memisahkan isotop menggunakan gaya sentrifugal.
 - *Laser Enrichment*: Menggunakan laser untuk memisahkan isotop berdasarkan spektrum absorpsi.

Fabrikasi Bahan Bakar:

- Uranium yang diperkaya diubah menjadi serbuk uranium dioksida (UO_2), kemudian dipadatkan menjadi pelet keramik.
- Pelet dimasukkan ke dalam tabung logam (*cladding*) yang terbuat dari zirkonium atau paduan logam lainnya untuk membentuk batang bahan bakar.
- Batang bahan bakar disusun menjadi rakitan bahan bakar (*fuel assembly*) yang siap digunakan di reaktor.

Reprocessing:

- Bahan bakar bekas dari reaktor masih mengandung uranium dan plutonium yang dapat digunakan kembali.
- Proses *reprocessing* melibatkan pemisahan uranium dan plutonium dari limbah radioaktif lainnya melalui proses kimia, seperti PUREX (*Plutonium Uranium Extraction*).
- Uranium dan plutonium yang dipulihkan dapat digunakan kembali sebagai bahan bakar (*MOX - Mixed Oxide Fuel*).

Tantangan:

- Proliferasi Nuklir: Reprocessing dapat menghasilkan plutonium, yang berpotensi disalahgunakan untuk senjata nuklir.
- Biaya Tinggi: Pengayaan dan reprocessing memerlukan teknologi canggih dan mahal.

3.3. Pengelolaan Bahan Bakar Bekas dan Daur Ulang

Pengelolaan Bahan Bakar Bekas:

- Bahan bakar bekas mengandung limbah radioaktif tingkat tinggi yang berbahaya bagi lingkungan dan manusia.
- Langkah-langkah pengelolaan:
 1. Penyimpanan Sementara: Bahan bakar bekas disimpan di kolam pendingin di lokasi PLTN selama beberapa tahun untuk mengurangi panas dan radiasi.
 2. Penyimpanan Jangka Panjang: Bahan bakar bekas dipindahkan ke fasilitas penyimpanan geologis dalam (*deep geological repository*) yang dirancang untuk menahan radiasi selama ribuan tahun.

Daur Ulang Bahan Bakar:

- Bahan bakar bekas dapat didaur ulang untuk memulihkan uranium dan plutonium yang masih dapat digunakan.
- Teknologi daur ulang:
 - o MOX Fuel: Menggunakan campuran uranium dan plutonium sebagai bahan bakar baru.
 - o *Fast Breeder Reactor* (FBR): Reaktor yang dapat menghasilkan lebih banyak bahan bakar daripada yang dikonsumsi, menggunakan plutonium dari bahan bakar bekas.

3.4. Tantangan Ekonomi dan Lingkungan

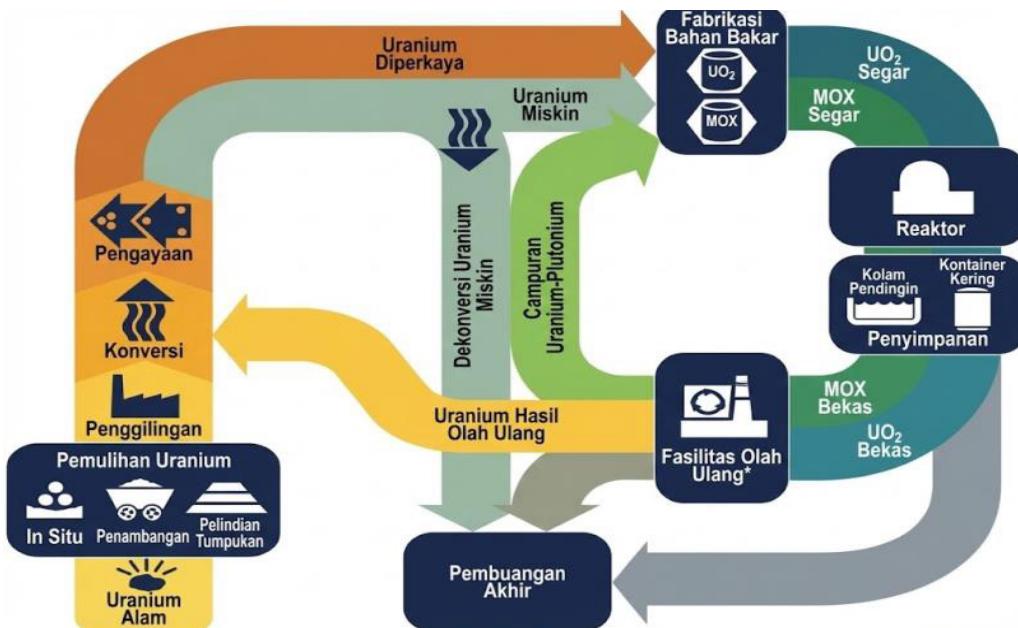
Ekonomi:

- Biaya siklus bahan bakar nuklir mencakup penambangan, pengayaan, fabrikasi, penggunaan, dan pengelolaan limbah.
- Tantangan utama:
 - o Fluktuasi harga uranium di pasar global.
 - o Biaya tinggi untuk pengayaan, reprocessing, dan penyimpanan limbah.

Lingkungan:

- Penambangan uranium dapat menyebabkan kerusakan lingkungan, seperti pencemaran air dan tanah.
- Limbah radioaktif memerlukan pengelolaan yang aman untuk mencegah kontaminasi lingkungan.

- Emisi karbon dari siklus bahan bakar nuklir relatif rendah dibandingkan dengan bahan bakar fosil, tetapi tetap ada dampak lingkungan dari penambangan dan pengolahan.



Gambar 10 Siklus bahan bakar nuklir.

Sumber: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fuel_cycle

3.5. Pentingnya Memahami Siklus Bahan Bakar Nuklir

1. Rantai Pasok yang Kompleks: Siklus bahan bakar nuklir melibatkan banyak tahapan dan teknologi, yang memerlukan koordinasi dan regulasi yang ketat.
2. Keselamatan dan Keamanan: Pengelolaan bahan bakar nuklir yang tidak tepat dapat menyebabkan risiko proliferasi nuklir dan kecelakaan radiasi.
3. Keberlanjutan: Daur ulang bahan bakar bekas dan penggunaan thorium dapat mengurangi ketergantungan pada uranium dan limbah radioaktif.
4. Dampak Lingkungan: Memahami siklus bahan bakar membantu mengidentifikasi dan memitigasi dampak lingkungan dari PLTN.
5. Ekonomi: Biaya siklus bahan bakar memengaruhi kelayakan ekonomi PLTN, sehingga perlu dipahami untuk perencanaan energi jangka panjang.

Siklus bahan bakar nuklir adalah proses yang kompleks dan multidisiplin, mencakup aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan.

04

KESELAMATAN DAN PENGENDALIAN PLTN

4.1. Prinsip Keselamatan Nuklir

Keselamatan adalah prioritas utama dalam operasi PLTN. Prinsip dasar keselamatan nuklir dirancang untuk:

1. Mencegah kecelakaan.
2. Meminimalkan dampak jika kecelakaan terjadi.

Sistem Keselamatan Pasif dan Aktif

1. Sistem Keselamatan Pasif:

- Berfungsi tanpa memerlukan sumber energi eksternal atau intervensi manusia.
- Contoh:
 - Gaya Gravitasi: Batang kendali jatuh otomatis ke inti reaktor jika terjadi kegagalan sistem.
 - Konveksi Alami: Pendinginan inti reaktor melalui sirkulasi alami air.

2. Sistem Keselamatan Aktif:

- Memerlukan sumber energi atau intervensi manusia.
- Contoh:
 - Pompa Pendingin Darurat: Mengalirkan air ke inti reaktor jika sistem pendingin utama gagal.
 - Sistem Injeksi Boron: Menyuntikkan boron (penyerap neutron) ke dalam pendingin untuk menghentikan reaksi berantai.

Desain Pertahanan Berlapis (*Defence in Depth*)

PLTN dirancang dengan beberapa lapis pengaman untuk mencegah pelepasan radioaktivitas:

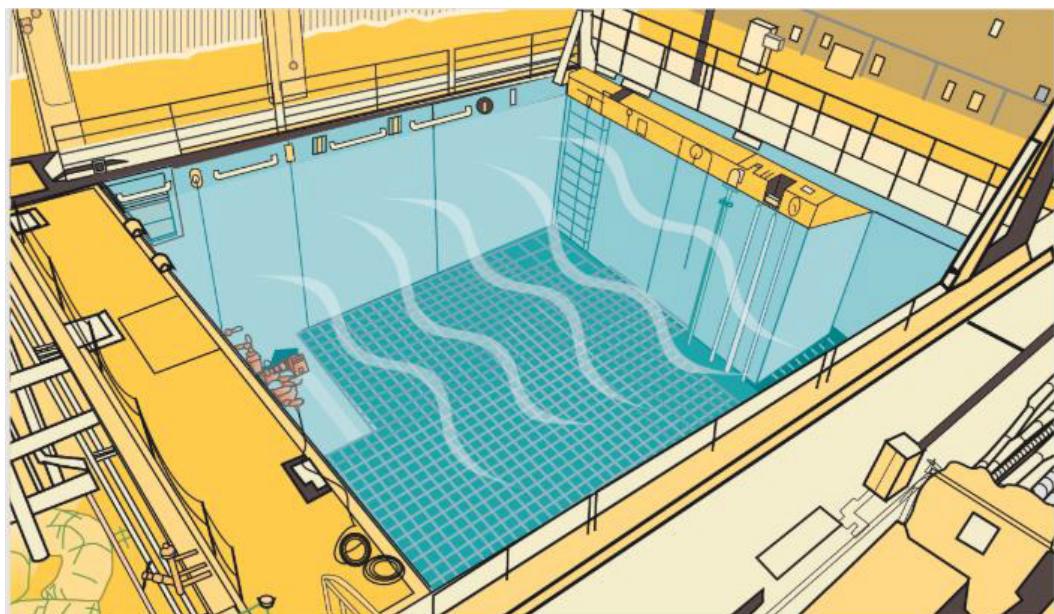
1. Lapis 1: Pencegahan abnormalitas operasi melalui desain dan prosedur operasi yang ketat.
2. Lapis 2: Deteksi dan pengendalian kejadian abnormal.
3. Lapis 3: Sistem keselamatan untuk mengatasi kecelakaan desain (*Design Basis Accident/DBA*).
4. Lapis 4: Pengendalian kecelakaan parah (seperti pelelehan inti).
5. Lapis 5: Mitigasi dampak radiasi terhadap masyarakat dan lingkungan.

4.2. Manajemen Bahan Bakar dan Limbah Nuklir

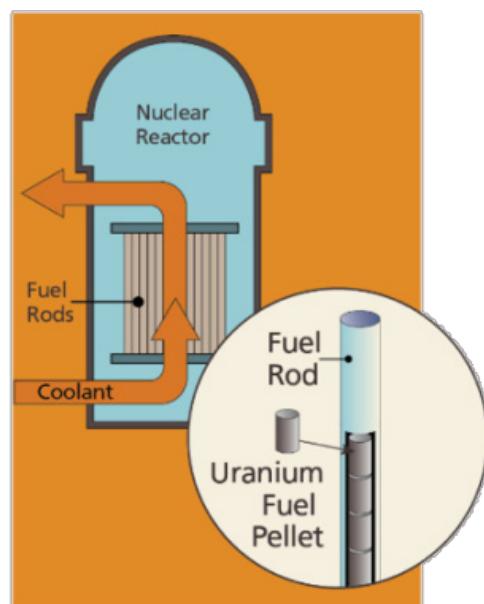
4.2.1. Siklus Bahan Bakar Nuklir

1. **Penyimpanan Sementara:** Bahan bakar bekas disimpan di kolam penyimpanan (spent fuel pool) selama beberapa tahun untuk mendinginkan dan mengurangi radioaktivitas.
2. **Daur Ulang:** Bahan bakar bekas dapat diproses ulang untuk memisahkan uranium dan plutonium yang masih bisa digunakan (contoh: di Prancis dan Jepang).
3. **Penyimpanan Jangka Panjang:** Limbah radioaktif tingkat tinggi disimpan dalam wadah kedap air dan dikubur di fasilitas geologi dalam (*deep geological repository*).

4.2.2. Pembentukan dan Penyimpanan Bahan Bakar Bekas Setelah Penggunaan

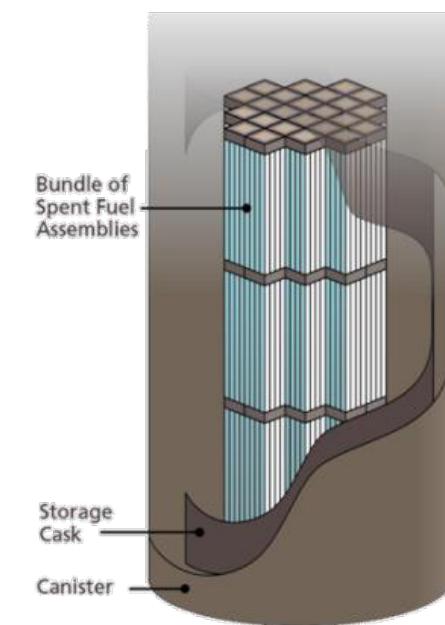
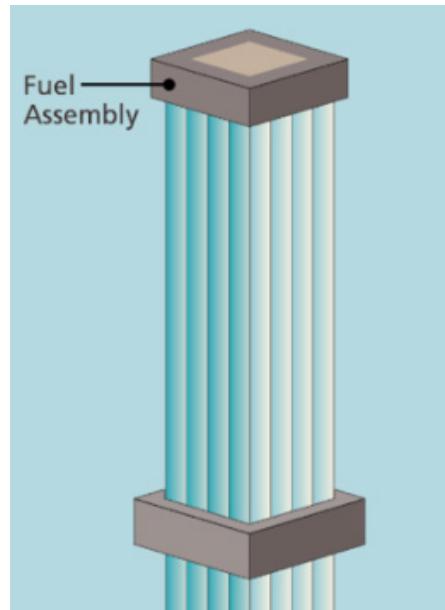


Sebuah reaktor nuklir ditenagai oleh uranium-235 yang diperkaya. Fisi (pembelahan atom) menghasilkan panas yang menghasilkan uap untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan listrik. Reaktor dengan kapasitas beberapa ratus megawatt dapat mengandung 100 ton atau lebih bahan bakar dalam bentuk pelet berukuran peluru yang dimuat ke dalam batang logam panjang yang kemudian dikumpulkan menjadi rak bahan bakar. Reaktor air bertekanan (*Pressurized-Water Reactors/PWR*) mengandung antara 150 hingga 200 rak bahan bakar, sementara reaktor air didih (*Boiling-Water Reactors/BWR*) mengandung antara 370 hingga 800 rak bahan bakar.



Setelah 5-6 tahun, rak bahan bakar yang telah digunakan—yang biasanya memiliki panjang 14 kaki (4,3 meter) dan mengandung hampir 200 batang bahan bakar untuk PWR serta 80-100 batang bahan bakar untuk BWR—dikeluarkan dari reaktor dan didinginkan di kolam penyimpanan. Pada tahap ini, rak bahan bakar yang beratnya 900 pon (409 kilogram) hanya mengandung sekitar seperlima dari jumlah uranium-235 aslinya.

Reaktor nuklir jenis air ringan komersial menyimpan bahan bakar radioaktif yang telah digunakan di dalam kolam beton yang dilapisi baja, dirancang khusus, dengan kedalaman sekitar 40 kaki (12,2 meter) di bawah air yang berfungsi sebagai pelindung radiasi. Pompa air menyediakan aliran air yang terus-menerus untuk mendinginkan bahan bakar yang telah digunakan. Air tambahan untuk kolam disediakan oleh pompa lain yang dapat ditenagai oleh generator diesel darurat yang berada di lokasi. Fitur pendukung, seperti pemantau level air dan detektor radiasi, juga terdapat di dalam kolam. Bahan bakar yang telah digunakan disimpan di kolam hingga dipindahkan ke wadah kering di lokasi (seperti yang ditunjukkan pada Gambar kanan) atau diangkut ke luar lokasi untuk penyimpanan sementara atau pembuangan



Gambar 11 Pembentukan dan Penyimpanan Bahan Bakar

Sumber gambar dan informasi: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/39/Spent_Fuel_Storage

4.2.3 Limbah Radioaktif

1. Klasifikasi Limbah:

- Limbah Tingkat Rendah: Peralatan terkontaminasi, pakaian pelindung.
- Limbah Tingkat Menengah: Resin bekas, komponen reaktor.
- Limbah Tingkat Tinggi: Bahan bakar bekas dan limbah hasil daur ulang.

2. Penanganan Limbah:

- Imobilisasi: Limbah dicampur dengan gelas atau semen untuk mencegah migrasi radioaktif.
- Isolasi: Penyimpanan dalam wadah tahan korosi dan lokasi geologi stabil.

4.3. Protokol Keselamatan dalam Keadaan Darurat

1. Deteksi Dini: Sistem pemantauan radiasi (*radiation monitors*) mendekripsi kebocoran radioaktif.
2. Isolasi Reaktor:
 - Reaktor dimatikan (SCRAM) dengan memasukkan batang kendali & Sistem pendingin darurat diaktifkan.
3. Evakuasi dan Perlindungan Masyarakat:
 - Zona evakuasi ditetapkan berdasarkan tingkat paparan radiasi.
 - Distribusi tablet yodium untuk mencegah penyerapan yodium radioaktif oleh tiroid.

4.4. Kesiapan Darurat dan Manajemen Krisis dalam PLTN

Kesiapan darurat dan manajemen krisis merupakan aspek krusial dalam pengoperasian Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Sistem ini dirancang untuk mencegah dan menangani insiden nuklir guna melindungi masyarakat dan lingkungan.

4.4.1 Zona Eksklusi dan Zona Perlindungan

Dalam kesiapan darurat nuklir, terdapat zona perlindungan yang ditetapkan berdasarkan potensi dampak radiasi:

1. Zona Eksklusi (*Exclusion Zone*)

- Area terdekat dengan reaktor yang dilarang untuk pemukiman dan aktivitas umum.
- Biasanya memiliki radius 3–5 km dari reaktor.
- Digunakan untuk keamanan dan operasi pemeliharaan reaktor.

2. Zona Tanggap Darurat (*Emergency Planning Zone, EPZ*)

- Radius 5–30 km dari PLTN.
- Persiapan evakuasi atau *shelter-in-place* jika terjadi pelepasan radiasi.
- Masyarakat di zona ini mendapatkan edukasi tentang tindakan darurat.

3. Zona Pemantauan Radiasi (*Radiation Monitoring Zone*)

- Area lebih luas (hingga 80 km) di mana pemantauan radiasi dilakukan secara terus-menerus.
- Jika terjadi kebocoran radiasi, masyarakat di zona ini mungkin diberikan instruksi untuk membatasi aktivitas di luar ruangan.

4.4.2 Prosedur Evakuasi dan Perlindungan Masyarakat

Jika terjadi kecelakaan di PLTN, langkah-langkah berikut dapat diambil:

Early Warning System (Sistem Peringatan Dini)

- Pemberitahuan melalui sirene, radio, dan SMS darurat kepada masyarakat sekitar.
- Peringatan ini mencakup tingkat keparahan insiden dan tindakan yang harus diambil.

Evakuasi Bertahap

- Warga di zona eksklusi dan tanggap darurat dievakuasi ke daerah aman.
- Evakuasi diatur untuk mencegah kemacetan dan kepanikan massal.
- Transportasi umum dan kendaraan darurat disediakan untuk kelompok rentan (anak-anak, lansia, dan orang sakit).

Shelter-in-Place (Berlindung di Tempat)

- Jika evakuasi tidak memungkinkan, masyarakat diminta tetap di dalam ruangan, menutup pintu dan jendela, serta menggunakan masker atau kain basah untuk mengurangi paparan radiasi.

Distribusi Tablet Iodin (Potassium Iodide, KI)

- Tablet KI membantu mencegah penyerapan yodium radioaktif oleh kelenjar tiroid.
- Biasanya diberikan kepada masyarakat di radius 20-30 km dari PLTN.

4.5. Teknologi Pemantauan Radiasi *Real-Time*

Teknologi pemantauan radiasi digunakan untuk mendeteksi dan menganalisis tingkat radiasi di sekitar PLTN secara *real-time*:

- Stasiun Pemantauan Radiasi Otomatis Dipasang di sekitar PLTN dan zona pemantauan. Menggunakan detektor *Geiger-Müller* dan detektor sintilasi untuk mengukur dosis radiasi. Data dikirim ke pusat pengendalian untuk analisis dan respons cepat.
- *Drones* dan Robot Pemantau Radiasi, Digunakan dalam kondisi berbahaya untuk mendeteksi kebocoran radiasi. Drone dapat menjangkau area yang sulit diakses dan mengirimkan data real-time.
- Sistem Prediksi Penyebaran Radiasi (*Atmospheric Dispersion Models*). Memanfaatkan pemodelan cuaca dan atmosfer untuk memperkirakan penyebaran radiasi jika terjadi kebocoran. Membantu menentukan zona evakuasi dan distribusi iodin.
- Aplikasi Mobile untuk Masyarakat. Aplikasi berbasis *smartphone* memungkinkan masyarakat melihat tingkat radiasi di lokasi mereka. Contoh: Aplikasi SAFER yang digunakan di Jepang setelah insiden Fukushima.

4.6. Contoh Kasus: Respons terhadap Insiden Fukushima (2011)

Penyebab Insiden

- Pada 11 Maret 2011, gempa bumi berkekuatan 9,0 SR dan tsunami menghantam PLTN Fukushima Daiichi di Jepang.
- Sistem pendingin reaktor gagal berfungsi akibat matinya pasokan listrik dan generator cadangan yang terendam air.
- Reaktor mengalami *overheating*, menyebabkan pelepasan radiasi ke lingkungan.

Respons Darurat : Evakuasi Cepat

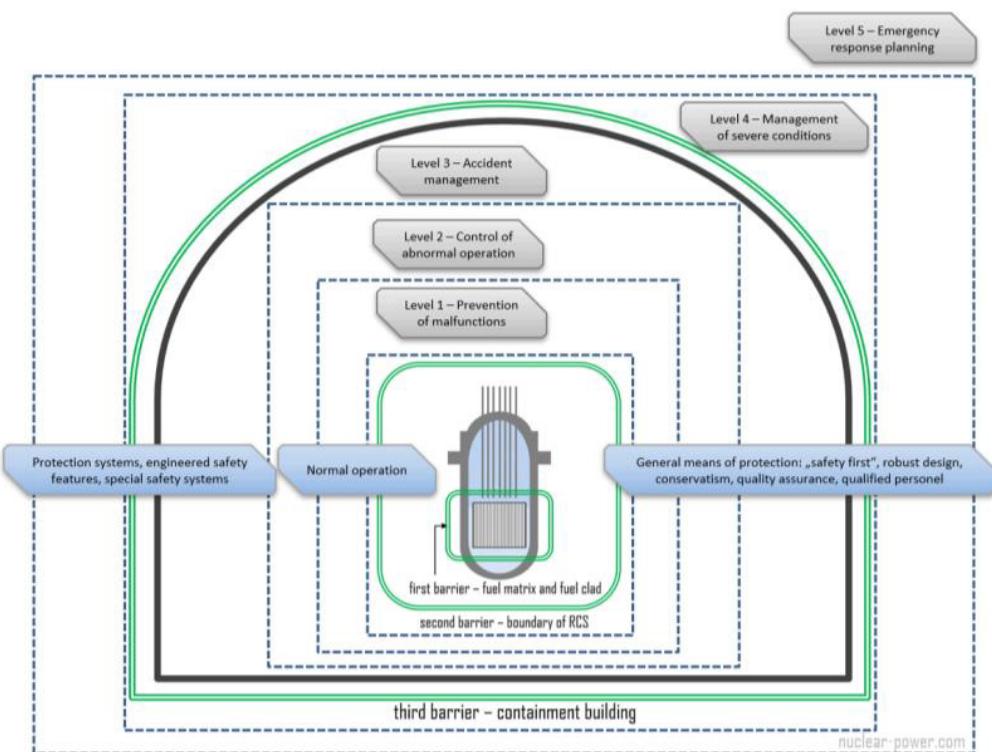
Pemerintah Jepang mengevakuasi lebih dari 150.000 warga dalam radius 20 km dari PLTN.

Upaya Pendinginan Reaktor

- Operator TEPCO (*Tokyo Electric Power Company*) menyuntikkan air laut dan boron untuk mencegah reaksi fisi lebih lanjut.
- Penyemprotan Air dan Robot Pemantau : *Drone* dan robot digunakan untuk memantau tingkat radiasi di dalam gedung reaktor.
- Pembentukan Zona Eksklusi : Area sekitar 30 km dari PLTN dilarang untuk dihuni dan menjadi zona eksklusi permanen.

Pelajaran Dari Insiden Fukushima

- Desain PLTN harus memperhitungkan bencana alam ekstrem -> PLTN baru wajib memiliki proteksi tambahan terhadap gempa dan tsunami.
- Sumber daya listrik cadangan harus lebih aman -> Generator cadangan harus ditempatkan di lokasi tinggi agar tidak terkena banjir.
- Komunikasi dan koordinasi lebih cepat diperlukan -> Jepang sempat mengalami keterlambatan dalam menginformasikan tingkat bahaya kepada masyarakat.
- Kesiapan darurat dan manajemen krisis adalah elemen penting dalam pengoperasian PLTN. Dengan adanya zona eksklusi, sistem evakuasi, dan teknologi pemantauan radiasi real-time, risiko akibat insiden nuklir dapat diminimalkan.
- Kasus Fukushima memberikan pelajaran bahwa desain PLTN harus lebih tahan terhadap bencana ekstrem, dan respons darurat harus lebih cepat serta terkoordinasi.
- Indonesia, jika ingin membangun PLTN, harus memastikan kesiapan sistem tanggap darurat yang kuat, termasuk edukasi masyarakat, teknologi pemantauan radiasi canggih, dan sistem evakuasi yang efektif.
- Sistem Keselamatan Pasif: Tangki air di atas reaktor mengalirkan air secara gravitasi jika terjadi kecelakaan.
- *Containment Ganda*: Lapisan beton dan baja untuk mencegah pelepasan radioaktivitas.



Gambar 12 Prinsip Keselamatan PLTN.

Sumber: <https://www.nuclear-power.com/wp-content/uploads/2021/05/nuclear-safety-defence-in-depth.png>

4.7. Dampak Lingkungan dan Sosial

4.7.1 Dampak Lingkungan

Emisi Gas Rumah Kaca

PLTN menghasilkan listrik dengan emisi CO_2 yang sangat rendah (hanya 12-16 g CO_2/kWh), terutama dari proses penambangan uranium, pengayaan, dan konstruksi PLTN.

Tabel 6. Perbandingan Emisi

Sumber Energi	Emisi CO ₂ (g/kWh)
PLTN	12-16
Batubara	820-1.050
Gas Alam	450-500
Tenaga Surya	40-50
Tenaga Angin	10-15

Dampak terhadap Ekosistem

Pemanfaatan Air:

- PLTN memerlukan air dalam jumlah besar untuk pendinginan, yang dapat memengaruhi ekosistem perairan lokal.
- Solusi: Penggunaan menara pendingin kering atau sistem daur ulang air.

Limbah Panas:

- Air yang dikembalikan ke sungai atau laut setelah pendinginan memiliki suhu lebih tinggi, berpotensi mengganggu kehidupan akuatik.
- Solusi: Pembangunan kolam pendingin atau penggunaan teknologi pendingin udara.

Ruang dan Lahan:

- PLTN memerlukan lahan lebih kecil dibandingkan pembangkit energi terbarukan seperti tenaga surya atau angin.
- Contoh: PLTN 1.000 MW memerlukan $\approx 1-2 \text{ km}^2$, sedangkan tenaga surya memerlukan $\approx 50-100 \text{ km}^2$ untuk kapasitas yang sama.

4.7.2 Aspek Sosial dan Ekonomi

Manfaat Ekonomi

Biaya Operasional Rendah:

- Biaya bahan bakar nuklir relatif stabil dan tidak terpengaruh fluktuasi harga bahan bakar fosil.
- Contoh: Biaya listrik PLTN di AS $\approx 30-40/\text{MWh}$, lebih rendah dari pada batubara ($30-40/\text{MWh}$, lebih rendah dari pada batubara ($60-100/\text{MWh}$).

Penciptaan Lapangan Kerja:

- PLTN menciptakan ribuan pekerjaan dalam konstruksi, operasi, dan pemeliharaan.
- Contoh: PLTN Barakah di Uni Emirat Arab menciptakan ≈ 10.000 pekerjaan selama konstruksi.

Ketahanan Energi:

- PLTN mengurangi ketergantungan pada penggunaan bahan bakar fosil, meningkatkan keandiran energi.

Isu Sosial dan Penerimaan Masyarakat

Kekhawatiran Keselamatan:

- Kecelakaan seperti Chernobyl (1986) dan Fukushima (2011) menimbulkan ketakutan publik terhadap PLTN.
- Solusi: Edukasi publik tentang teknologi nuklir modern dan sistem keselamatan canggih.

Limbah Radioaktif:

- Penyimpanan limbah radioaktif jangka panjang sering menjadi isu kontroversial.
- Solusi: Pengembangan fasilitas penyimpanan geologi dalam (contoh: Onkalo di Finlandia).

Dukungan Publik:

- Survei menunjukkan dukungan publik terhadap PLTN bervariasi tergantung pada tingkat pengetahuan dan lokasi.
- Contoh: Di Prancis, 70% masyarakat mendukung PLTN karena kontribusinya terhadap ketahanan energi.

4.7.3 Perbandingan dengan Sumber Energi Lain

a. Keunggulan PLTN:

1. Densitas Energi Tinggi:
 - 1 kg uranium-235 setara dengan 3 juta kg batubara.
2. Stabilitas Pasokan:
 - PLTN dapat beroperasi 24/7, tidak tergantung pada cuaca seperti tenaga surya atau angin.

3. Emisi Rendah:

- Kontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim.

b. Kelemahan PLTN:

1. Biaya Modal Tinggi:

- Konstruksi PLTN memerlukan investasi besar ($\approx \$6-9$ miliar untuk reaktor 1.000 MW).

2. Risiko Kecelakaan:

- Meskipun jarang, kecelakaan nuklir dapat memiliki dampak jangka panjang.

3. Limbah Radioaktif:

- Memerlukan penanganan dan penyimpanan khusus selama ribuan tahun.

Contoh PLTN di Berbagai Negara

1. Prancis:

- 70% listrik nasional berasal dari PLTN.
- Masyarakat mendukung PLTN karena kontribusinya terhadap kemandirian energi dan ekonomi.

2. Jerman:

- Memutuskan untuk menghentikan PLTN (*Energiewende*) pasca-Fukushima, beralih ke energi terbarukan.
- Tantangan: Peningkatan biaya listrik dan ketergantungan pada gas alam impor.

3. Tiongkok:

- Memimpin dalam pembangunan PLTN baru, dengan target 150 GW kapasitas nuklir pada 2030.
- Alasan: Mengurangi polusi udara dan emisi CO₂.

05

KERANGKA PENGATURAN GLOBAL DAN MANAJEMEN RISIKO TEKNOLOGI PLTN

Pengembangan dan pemanfaatan teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) tidak dapat dilepaskan dari sistem pengaturan global yang ketat dan manajemen risiko yang holistik. Bab ini membahas fondasi pengaturan internasional yang diwakili oleh kerangka IAEA 3S (*Safety, Security, Safeguards*), pendekatan terpadu dalam manajemen risiko nuklir, serta analisis komparatif ilmiah risiko teknologi PLTN dibandingkan dengan sumber energi lainnya.

5.1 IAEA 3S: *Safety, Security, Safeguards* - Fondasi Pengaturan Global

Kerangka *Safety, Security, dan Safeguards* (3S) yang dikembangkan oleh International Atomic Energy Agency (IAEA) merupakan fondasi global untuk memastikan pemanfaatan energi nuklir yang aman, aman, dan damai. Ketiga pilar ini saling terkait, saling memperkuat, dan harus diimplementasikan secara terintegrasi, meskipun masing-masing memiliki fokus, pendekatan, dan instrumen hukum yang berbeda.

5.1.1 **Safety (Keselamatan Nuklir): Melindungi dari Risiko yang Tidak Disengaja**

Definisi: Safety atau Keselamatan Nuklir berkaitan dengan perlindungan individu, masyarakat, dan lingkungan dari bahaya radiasi yang timbul dari penggunaan teknologi nuklir. Fokusnya adalah mencegah terjadinya kecelakaan atau paparan

radiasi yang tidak terkendali, baik dalam kondisi operasi normal maupun kondisi kecelakaan.

Prinsip-Prinsip Fundamental (IAEA Safety Fundamentals SF-1):

Prinsip-prinsip ini menjadi acuan universal bagi semua program tenaga nuklir.

1. Tanggung Jawab atas Keselamatan: Pemegang izin atau *licensee* (biasanya operator PLTN) memikul tanggung jawab utama atas keselamatan instalasi.
2. Peran Pemerintah: Pemerintah wajib membentuk kerangka hukum dan regulator nasional yang kuat, mandiri, dan efektif. Di Indonesia, fungsi ini diemban oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN).
3. Kepemimpinan dan Manajemen untuk Keselamatan: Budaya keselamatan (*safety culture*) yang kuat harus dibangun dan dipelihara di semua level organisasi, mulai dari pimpinan hingga staf lapangan.
4. Justifikasi: Setiap praktik yang melibatkan paparan radiasi harus memberikan manfaat yang lebih besar daripada risikonya.
5. Optimasi (ALARA): Besaran dosis, jumlah individu yang terpapar, dan kemungkinan paparan harus diupayakan serendah mungkin yang dapat dicapai secara wajar (*As Low As Reasonably Achievable*).
6. Pembatasan Dosis: Paparan radiasi individu tidak boleh melampaui batas yang ditetapkan dalam regulasi.
7. Perlindungan Generasi Sekarang dan Masa Depan: Dampak radiologi jangka panjang terhadap generasi mendatang harus diperhitungkan.
8. Pencegahan Kecelakaan: Upaya optimal harus dilakukan untuk mencegah terjadinya kecelakaan nuklir.
9. Kesiapsiagaan dan Tanggap Darurat: Rencana dan kapabilitas tanggap darurat harus disiapkan untuk kejadian radiologi.
10. Tindakan Perlindungan: Tindakan perlindungan harus diambil untuk mengurangi konsekuensi radiologi jika terjadi kecelakaan.

Implementasi Melalui *Defence-in-Depth* (DiD): Konsep Defence-in-Depth (Pertahanan Berlapis) adalah strategi fundamental dalam keselamatan nuklir, yang diimplementasikan melalui lima lapis pertahanan untuk mengompensasi kegagalan potensial:

1. Tingkat 1 (Pencegahan): Mencegah anomali operasi melalui desain yang matang, kualitas tinggi, dan operasi yang hati-hati.
2. Tingkat 2 (Pengendalian): Mengendalikan anomali operasi melalui sistem kendali dan prosedur operasi yang andal.

3. Tingkat 3 (Pengendalian Kecelakaan Desain): Mengendalikan kecelakaan dalam batas desain dengan mengandalkan sistem keselamatan terpasang (misalnya, sistem injeksi bahan pendingin darurat).
4. Tingkat 4 (Pengendalian Kecelakaan Parah): Mencegah eskalasi kecelakaan dan membatasi pelepasan zat radioaktif melalui sistem pengungkung (*containment*) dan manajemen kecelakaan parah.
5. Tingkat 5 (Mitigasi Konsekuensi): Memitigasi konsekuensi radiologi dari pelepasan radioaktif yang signifikan melalui rencana tanggap darurat di luar tapak (*off-site emergency plan*).

5.1.2 Security (Keamanan Nuklir): Melindungi dari Tindakan Berbahaya yang Disengaja

Definisi: Security atau Keamanan Nuklir berkaitan dengan pencegahan, deteksi, dan respons terhadap tindakan berbahaya yang disengaja atau tidak sah (seperti sabotase, terorisme, pencurian) yang melibatkan bahan nuklir, bahan radioaktif lainnya, atau fasilitas terkait.

Dokumen dan Standar Acuan: Dokumen utama adalah IAEA INFCIRC/225/ Rev.5 (*Nuclear Security Recommendations on Physical Protection*) dan serangkaian publikasi panduan teknis.

Komponen Sistem Keamanan Fisik: Sistem ini dirancang berdasarkan ancaman yang ditetapkan (*Design Basis Threat* - DBT).

1. Penilaian Ancaman (*Threat Assessment*): Mendefinisikan DBT, yaitu atribut dan karakteristik potensial dari aktor internal atau eksternal yang mungkin berusaha melakukan tindakan tidak sah.
2. Sistem Deteksi (*Detection*): Menggunakan teknologi seperti CCTV, sensor gerak, sensor radiasi, dan kontrol akses terotentikasi (biometrik, kartu akses) untuk mendeteksi penyusupan atau aktivitas tidak sah.
3. Sistem Penundaan (*Delay*): Barier fisik seperti pagar tinggi, pintu peledak tahan (*blast-resistant*), dan mantraps untuk memperlambat pergerakan penyusup, memberi waktu bagi respons.
4. Sistem Respons (*Response*): Tim keamanan terlatih dan terkordinasi dengan aparat keamanan negara untuk merespons dan menetralisir ancaman.
5. Keamanan Siber (*Cybersecurity*): Proteksi sistem kendali digital dan jaringan informasi kritis dari serangan siber yang dapat mengganggu operasi keselamatan dan keamanan.

Kultur Keamanan (*Security Culture*): Sejalan dengan budaya keselamatan, budaya keamanan adalah seperangkat sikap dan perilaku individu dan organisasi

yang menekankan bahwa isu keamanan nuklir menerima perhatian yang layak berdasarkan kepentingannya.

5.1.3 *Safeguards: Memastikan Penggunaan Damai*

Safeguards adalah sistem verifikasi yang dikelola IAEA untuk memberikan jaminan yang kredibel kepada masyarakat internasional bahwa suatu negara memenuhi komitmennya untuk menggunakan bahan dan teknologi nuklir hanya untuk tujuan damai, dan tidak untuk mengembangkan senjata nuklir.

Landasan Hukum:

1. Perjanjian Non-Proliferasi Nuklir (NPT) 1968: Menjadi dasar politik untuk komitmen non-proliferasi.
2. Perjanjian Safeguards Komprehensif (*Comprehensive Safeguards Agreement - CSA*): Diwajibkan bagi semua negara non-nuklir anggota NPT. CSA memberikan IAEA wewenang untuk memverifikasi bahwa semua bahan nuklir di negara tersebut tetap dalam kegiatan damai.
3. Protokol Tambahan (*Additional Protocol - AP*): Memperkuat CSA dengan memberikan akses informasi dan lokasi yang lebih luas kepada IAEA, serta wewenang inspeksi yang lebih kuat, sehingga meningkatkan kemampuan deteksi dini penyimpangan.

Metode Verifikasi IAEA:

1. Akuntansi Material Nuklir (*Material Accounting*): Pencatatan dan pelaporan rinci semua bahan nuklir (uranium, plutonium) oleh negara kepada IAEA.
2. Pengawasan (*Containment & Surveillance*): Menggunakan segel (*seals*) yang tidak dapat ditembus dan kamera pengawas untuk memantau pergerakan atau akses ke bahan atau peralatan kritis.
3. Inspeksi: Inspektor IAEA melakukan kunjungan rutin dan tak terduga ke fasilitas nuklir untuk memeriksa catatan, memverifikasi stok material, dan memasang/membaca perangkat pengawasan.
4. Pengambilan Sampel Lingkungan (*Environmental Sampling*): Mengambil sampel swipe dari permukaan di dalam fasilitas untuk mendeteksi jejak partikel bahan nuklir yang tidak dilaporkan.

5.2. Manajemen Risiko Nuklir: Pendekatan Holistik dan Terintegrasi

Manajemen risiko nuklir mengintegrasikan ketiga pilar 3S ke dalam suatu pendekatan sistematis, proaktif, dan berkelanjutan untuk mengidentifikasi, menilai, memprioritaskan, dan mengendalikan semua risiko yang terkait dengan program tenaga nuklir.

5.2.1 Sumber dan Klasifikasi Risiko Utama

Risiko dalam program PLTN dapat diklasifikasikan berdasarkan pilar 3S:

- Risiko Keselamatan (*Safety*):
 - Kecelakaan akibat kegagalan sistem, kesalahan manusia, atau bencana alam.
 - Paparan radiasi pekerja dan publik di luar batas yang ditetapkan.
 - Pelepasan bahan radioaktif tidak terkendali ke lingkungan.
- Risiko Keamanan (*Security*):
 - Sabotase terhadap sistem keselamatan kritis.
 - Pencurian atau penyimpangan bahan nuklir untuk tujuan kriminal.
 - Serangan siber yang mengganggu fungsi keselamatan atau kontrol.
- Risiko Safeguards (*Safeguards*):
 - Penyimpangan program nuklir sipil ke tujuan senjata (proliferasi).
 - Pelanggaran perjanjian internasional yang merusak kepercayaan global.
 - Sanksi ekonomi dan politik dari masyarakat internasional.

5.2.2 Strategi Mitigasi Risiko Terintegrasi

Strategi manajemen risiko menerapkan hirarki kontrol yang terintegrasi:

1. Pencegahan (*Prevention*): Mengeliminasi risiko dari sumbernya melalui desain yang inheren aman (*inherent safety*), prosedur operasi yang ketat, seleksi dan pelatihan SDM berkualitas, dan budaya keselamatan/keamanan yang kuat.
2. Pengendalian (*Control*): Membatasi kemungkinan atau konsekuensi kejadian risiko dengan sistem pertahanan berlapis (*Defence-in-Depth*), sistem keamanan fisik, dan program safeguards.

3. Mitigasi (*Mitigation*): Mengurangi dampak dari kejadian risiko yang terjadi melalui rencana tanggap darurat yang efektif, sistem pengungkung, dan infrastruktur kesehatan masyarakat.
4. Kesiapan Pemulihan (*Preparedness for Recovery*): Memiliki rencana dan sumber daya untuk memulihkan kondisi normal, remediasi lingkungan, dan memulihkan kepercayaan publik pasca-insiden.

5.2.3 Pengambilan Keputusan Berbasis Risiko (*Risk-Informed Decision Making*)

Pendekatan modern dalam regulasi dan pengelolaan PLTN yang melengkapi persyaratan deterministik dengan analisis probabilistik.

- Analisis Probabilistik Risiko (*Probabilistic Risk Assessment* - PRA): Metode kuantitatif untuk mengidentifikasi sekumpulan kejadian awal potensial, menganalisis urutan kegagalan berikutnya, dan memperkirakan probabilitas serta konsekuensi dari berbagai skenario kecelakaan. Hasil PRA digunakan untuk mengoptimalkan sumber daya dan fokus pada risiko yang paling signifikan.
- Regulasi Berbasis Kinerja (*Performance-Based Regulation*): Regulator menetapkan tujuan keselamatan dan kinerja yang harus dicapai, memberikan fleksibilitas kepada operator untuk memilih cara terbaik untuk mencapainya, asalkan dapat mendemonstrasikan kepatuhan. Ini mendorong inovasi dan peningkatan berkelanjutan.
- Pembelajaran dan Peningkatan Berkelanjutan (*Continual Improvement*): Mengintegrasikan pelajaran dari pengalaman operasi global (misalnya, pembelajaran pasca-Fukushima), temuan inspeksi, dan hasil penelitian terbaru ke dalam desain, regulasi, dan praktik operasi.

5.3 Analisis Komparatif Risiko: PLTN dalam Perspektif Sistem Energi Global

Untuk menilai PLTN secara objektif, perlu dilakukan perbandingan ilmiah terhadap teknologi pembangkit listrik lainnya. Tabel 5.1 menyajikan analisis komparatif menyeluruh berdasarkan data otoritatif global.

Tabel 7 Analisis Komparatif Risiko dan Dampak Berbagai Teknologi Pembangkit Listrik

Parameter	PLTN (Generasi III+)	PLTU Batubara	PLTG/PLTGU (Gas)
1. RISIKO KESEHATAN			
Kematian per TWh	0.03 - 0.07	18 - 32	2 - 5
Sumber Risiko	<ul style="list-style-type: none"> - Kecelakaan besar (sangat jarang) - Paparan radiasi pekerja (rendah) 	<ul style="list-style-type: none"> - Polusi udara kronis (PM2.5, SOx, NOx, logam berat) - Kecelakaan tambang - Penyakit pernapasan/kardiovaskular 	<ul style="list-style-type: none"> - Polusi udara (NOx) - Kecelakaan industri/kebocoran gas
Sifat Risiko	Potensial, spektakuler, probabilitas sangat rendah	Nyata, sistematis, harian, tersebar	Nyata, moderat, lokal
2. RISIKO LINGKUNGAN			
Emisi GRK (gCO ₂ eq/kWh)	4 - 12	740 - 910	410 - 650
Polusi Udara Operasional	Tidak ada	Tinggi (SOx, NOx, PM, Hg)	Sedang (NOx)
Limbah Padat	Volume sangat kecil (≈ 30 ton/tahun) tapi radioaktif (HLW/ILW)	Volume sangat besar (abu, ≈ 300.000 ton/tahun), beracun	Minimal
Footprint Lahan	Kecil (1-4 km ² /GWe)	Kecil untuk pembangkit, besar untuk tambang & penimbunan abu	Kecil
3. RISIKO KEAMANAN			
Ancaman Fisik/Sabotase	Tinggi (target bernilai tinggi)	Rendah-Sedang	Sedang
Keamanan Siber	Sangat Tinggi (aset nasional kritis)	Sedang	Sedang
Ketahanan Bahan Bakar	18-24 bulan sekali isi, harga stabil, pasokan terdiversifikasi	Pasokan harian, rantai panjang, harga fluktuatif	Pasokan kontinu, harga sangat fluktuatif, impor
4. RISIKO OPERASIONAL			
Ketersediaan (Faktor Kapasitas)	Tinggi (80-93% CF)	Tinggi (70-85% CF)	Tinggi (PLTGU: 85% CF)
Sifat Pembangkitan	Baseload, dapat dimodulasi	Baseload, sulit dimodulasi	Puncak/Menengah, sangat fleksibel
Ketergantungan Impor Teknologi	Tinggi (awal), dapat dilokalkan	Rendah-Menengah	Sedang
5. ASPEK EKONOMI			
Biaya Modal (LCOE)	Sangat Tinggi	Menengah	Rendah-Menengah
Biaya Operasi & Pemeliharaan	Rendah (setelah investasi)	Menengah-Tinggi (bahan bakar & lingkungan)	Tinggi (didominasi bahan bakar)
Umur Ekonomi	60+ tahun	30-40 tahun	25-30 tahun

Sumber Data Sintesis: IPCC AR6 (2022), UNECE (2022), WHO, IAEA, IEA, NEA/OECD, The Lancet.

Keterangan: CF = Capacity Factor; LCOE = Levelized Cost of Electricity; HLW/ILW = High/Intermediate Level Waste.

5.3.1 Analisis dan Interpretasi Komparatif

1. Profil Risiko yang Kontras:

- o PLTU Batubara memiliki risiko kesehatan dan lingkungan yang nyata, sistematis, dan terjadi setiap hari selama operasi normal. Dampaknya terukur dalam peningkatan angka kematian dini dan penyakit kronis secara global.
- o PLTN memiliki risiko utama berupa kecelakaan besar berprobabilitas sangat rendah namun berpotensi konsekuensi tinggi. Namun, sistem keselamatan berlapis, regulasi ketat, dan pembelajaran dari pengalaman membuat angka kematian rata-ratanya sangat rendah.
- o Energi Terbarukan (ET) memiliki risiko operasional dan kesehatan terendah, namun menghadapi tantangan intermitensi, kebutuhan lahan luas, dan risiko limbah akhir masa pakai yang masih berkembang.

2. Trade-off yang Kritis dalam Kebijakan Energi:

- o Keandalan vs. Kebersihan vs. Intermitensi: PLTN menawarkan kombinasi unik: keandalan tinggi (*baseload*) TANPA emisi operasional, suatu keunggulan yang tidak dimiliki PLTU (andal tapi kotor) maupun ET (bersih tapi intermiten).
- o Limbah vs. Emisi: PLTN menghasilkan limbah radioaktif padat dalam volume kecil yang terkelola dan terkungkung, sementara PLTU menghasilkan emisi gas rumah kaca dan polutan dalam volume besar yang terlepas tak terkendali ke atmosfer.

3. Implikasi untuk Konteks Indonesia:

- o Beban Kesehatan Ganda: Ketergantungan pada PLTU tidak hanya menyumbang emisi GRK secara kronis, tetapi juga menimbulkan beban kesehatan akut dari polusi udara lokal.
- o Ketahanan Energi: Volatilitas harga batubara dan gas global mengancam stabilitas harga listrik domestik. Uranium menawarkan prediktabilitas biaya bahan bakar jangka panjang.
- o Integrasi Grid untuk NZE: PLTN dapat berperan sebagai pilar *baseload* bersih yang stabil, memungkinkan integrasi masif energi surya dan angin yang intermiten ke dalam *grid* secara lebih andal menuju target *Net Zero Emission* (NZE) 2060.

5.3.2 Mitos vs. Fakta tentang Risiko Nuklir

- Mitos 1: "PLTN sangat berbahaya dan telah membunuh banyak orang."
 - Fakta: Berdasarkan data siklus hidup, PLTN adalah salah satu sumber energi teraman per unit listrik. Kematian terkait PLTN sangat rendah dan terutama berasal dari kecelakaan historis dengan desain yang sudah usang dan tidak lagi digunakan.
- Mitos 2: "Limbah nuklir adalah masalah tak terselesaikan."
 - Fakta: Limbah nuklir adalah satu-satunya limbah industri berbahaya yang dikelola secara penuh sejak awal, dengan biaya internalisasi. Solusi teknis (penyimpanan kering, repositori geologis) telah matang dan diimplementasikan di beberapa negara (Finlandia, Swedia).
- Mitos 3: "Energi terbarukan sudah cukup, tidak perlu nuklir."
 - Fakta: Meskipun ET penting, sifat intermiten dan kebutuhan lahan/ material yang masif menciptakan tantangan besar untuk sistem energi 100% ET. Portofolio energi yang beragam-termasuk sumber bersih yang dispatchable seperti nuklir, hidro, atau panas bumi-sering kali lebih tangguh, terjangkau, dan realistik.

5.4 Integrasi Kerangka 3S dan Manajemen Risiko dalam Program PLTN Nasional

Bagi Indonesia sebagai newcomer country, membangun dan mengintegrasikan kerangka 3S yang kuat ke dalam tata kelola program nuklir nasional adalah prasyarat mutlak untuk keberhasilan dan keberterimaan program.

5.4.1 Roadmap Implementasi Berfase

1. Fase Pra-Komitmen (Saat Ini - Sebelum Keputusan Investasi):

- Penguatan Regulator: Memperkuat kapasitas teknis, independensi, dan sumber daya Pengawas Nuklir.
- Kerangka Hukum: Menyempurnakan Regulasi tentang Ketenaganukliran dan peraturan turunannya agar selaras dengan standar IAEA terkini.
- Kesiapan SDM: Membangun fondasi pendidikan dan pelatihan di bidang keselamatan, keamanan, dan safeguards.
- Keterlibatan Publik: Memulai program awareness, dialog sosial transparan tentang manfaat dan risiko.

2. Fase Persiapan dan Konstruksi:

- *3S by Design*: Memastikan prinsip keselamatan, keamanan, dan safeguards terintegrasi dalam desain rekayasa (*Safety/Security/Safeguards by Design*).
- Infrastruktur Pendukung: Membangun sistem pelaporan material nuklir, sistem tanggap darurat nasional, dan pusat krisis siber.
- Penyiapan Regulasi Operasional: Menyusun panduan teknis rinci untuk lisensi, inspeksi, dan penegakan hukum.

3. Fase Operasi dan *Decommissioning*:

- Budaya Organisasi: Menanamkan budaya keselamatan dan keamanan yang kuat di tubuh operator calon pengelola PLTN.
- Sistem Manajemen Terintegrasi: Mengoperasikan sistem yang menggabungkan aspek 3S dalam prosedur harian, pemantauan, dan audit.
- Kesiapan Darurat: Melaksanakan latihan rutin dan memperbarui rencana tanggap darurat.
- Transparansi Internasional: Mematuhi pelaporan kepada Bapeten, IAEA dan menjalani inspeksi safeguards secara rutin.

5.4.2. Peran dan Sinergi Multi-Pemangku Kepentingan

- Pemerintah & Parlemen: Menetapkan kebijakan energi nasional yang jelas, mengalokasikan sumber daya, meratifikasi perjanjian internasional, dan memberikan kepemimpinan politik.
- Regulator (BAPETEN): Menetapkan standar, memberikan lisensi, melakukan inspeksi dan penilaian, serta menegakkan kepatuhan secara independen dan berwibawa.
- Operator/Utilitas: Bertanggung jawab penuh atas implementasi 3S di tingkat fasilitas, membangun budaya keselamatan, dan beroperasi dengan penuh kehati-hatian.
- Komunitas Ilmiah & Akademik: Menyediakan riset independen, analisis kebijakan, dan pendidikan SDM berkualitas tinggi.
- Masyarakat & Media: Berperan dalam pengawasan sosial, menuntut transparansi, dan berpartisipasi dalam proses pengambilan keputusan melalui dialog yang informatif.

5.5. Kesimpulan

Kerangka IAEA 3S (*Safety, Security, Safeguards*) bersama dengan pendekatan manajemen risiko yang holistik dan berbasis bukti, merupakan sistem pengaturan global yang telah terbukti matang dan efektif dalam memastikan pemanfaatan energi nuklir yang bertanggung jawab, aman, dan untuk tujuan damai.

Analisis ilmiah komparatif yang objektif menunjukkan bahwa tidak ada sumber energi yang bebas risiko. Setiap teknologi memiliki profil risiko, keunggulan, dan tantangannya sendiri:

- PLTN menawarkan solusi baseload bersih dengan emisi nol operasional, keandalan tinggi, dan jejak lahan kecil, dengan risiko utama yang dikelola melalui sistem pengaturan paling ketat di dunia.
- Ketergantungan pada bahan bakar fosil (terutama batubara) membawa risiko kesehatan publik dan lingkungan yang nyata dan sistematis, yang saat ini menjadi beban besar bagi Indonesia.
- Energi Terbarukan adalah pilar utama transisi energi, namun membutuhkan teknologi pendukung (*storage, grid* cerdas) dan lahan yang sangat luas untuk mengantikan pembangkit baseload sepenuhnya.

Bagi Indonesia, memasuki era teknologi PLTN dengan kesadaran penuh akan kerangka 3S dan manajemen risiko terintegrasi bukan hanya kewajiban internasional, melainkan sebuah investasi strategis untuk membangun tata kelola energi kelas dunia. Penerapan 3S yang ketat sejak awal adalah kunci untuk membangun kepercayaan (*trust*)-baik dari masyarakat domestik maupun komunitas internasional-yang merupakan aset tak ternilai bagi keberlanjutan program nuklir nasional.

Oleh karena itu, pendekatan yang paling bijaksana menuju NZE 2060 adalah membangun portofolio energi berimbang dan komplementer, di mana PLTN berpotensi berperan sebagai pilar ketahanan dan penstabil sistem yang memungkinkan pemanfaatan maksimal sumber energi terbarukan yang melimpah di Nusantara, sekaligus mengurangi beban kesehatan dan lingkungan dari polusi udara serta ketergantungan pada bahan bakar fosil impor.

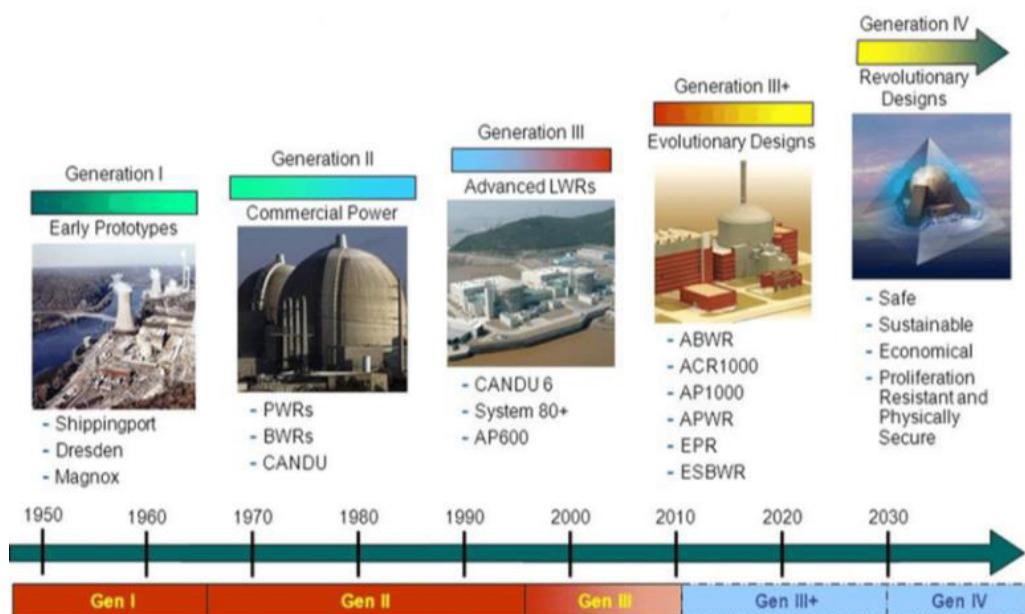


06

MASA DEPAN ENERGI NUKLIR

6.1. Teknologi PLTN Generasi IV: Masa Depan Energi Nuklir

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) Generasi IV adalah teknologi reaktor nuklir yang sedang dikembangkan untuk menjawab tantangan energi masa depan. Generasi ini dirancang untuk lebih efisien, aman, ramah lingkungan, dan berkelanjutan dibandingkan reaktor nuklir generasi sebelumnya.



Gambar 13 Generasi PLTN.

Sumber: https://www.researchgate.net/figure/Generations-of-nuclear-reactors-1_fig2_340514793

A. Latar Belakang PLTN Generasi IV

PLTN Generasi IV dikembangkan sebagai bagian dari Generasi IV International Forum (GIF), sebuah kolaborasi internasional yang terdiri dari 14 negara, termasuk Amerika Serikat, Prancis, Jepang, dan Rusia.

Tujuannya adalah menciptakan reaktor nuklir yang:

- Lebih efisien dalam menghasilkan energi.
- Lebih aman dengan risiko kecelakaan yang minimal.
- Mengurangi limbah radioaktif.
- Mampu memanfaatkan bahan bakar nuklir secara lebih optimal.
- Tahan terhadap proliferasi senjata nuklir (penyebaran bahan nuklir untuk senjata).

B. Jenis-Jenis Reaktor Generasi IV

Ada enam jenis reaktor yang termasuk dalam kategori Generasi IV. Setiap jenis memiliki keunikan dan keunggulan tersendiri:

1. *Very High-Temperature Reactor (VHTR)*
 - Menggunakan gas helium sebagai pendingin.
 - Dapat mencapai suhu operasi sangat tinggi (hingga 1000°C).
 - Cocok untuk menghasilkan listrik dan hidrogen sebagai bahan bakar alternatif.
 - Contoh: Reaktor HTR-PM di China.
2. *Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR)*
 - Menggunakan natrium cair sebagai pendingin.
 - Dirancang untuk memanfaatkan limbah nuklir sebagai bahan bakar.
 - Efisiensi tinggi dan mampu mengurangi limbah radioaktif jangka panjang.
 - Contoh: Reaktor BN-800 di Rusia.
3. *Supercritical Water-Cooled Reactor (SCWR)*
 - Menggunakan air superkritis (air pada suhu dan tekanan sangat tinggi) sebagai pendingin.
 - Efisiensi termal yang tinggi karena air superkritis memiliki sifat unik.
 - Cocok untuk menggantikan reaktor berbahan bakar fosil.

4. *Gas-Cooled Fast Reactor* (GFR)

- Menggunakan gas (seperti helium) sebagai pendingin.
- Dirancang untuk efisiensi tinggi dan mengurangi limbah nuklir.
- Dapat beroperasi pada suhu tinggi seperti VHTR.

5. *Lead-Cooled Fast Reactor* (LFR)

- Menggunakan timbal cair atau campuran timbal-bismut sebagai pendingin.
- Aman karena timbal memiliki titik didih tinggi dan tidak bereaksi dengan air atau udara.
- Cocok untuk aplikasi skala kecil seperti pembangkit listrik di daerah terpencil.

6. *Molten Salt Reactor* (MSR)

- Menggunakan garam cair sebagai pendingin dan bahan bakar.
- Bahan bakar nuklir dilarutkan dalam garam cair, sehingga reaktor lebih aman dan efisien.
- Dapat mengurangi limbah radioaktif dan risiko kecelakaan.
- Contoh: Proyek MSRE di Amerika Serikat.

C. Keunggulan PLTN Generasi IV

Berikut adalah keunggulan utama reaktor Generasi IV dibandingkan reaktor generasi sebelumnya:

1. Efisiensi Energi yang Tinggi

- Reaktor Generasi IV dirancang untuk menghasilkan lebih banyak energi dari bahan bakar yang sama.
- Beberapa reaktor dapat mencapai efisiensi termal hingga 50%, jauh lebih tinggi daripada reaktor generasi sebelumnya (30-35%).

2. Pengurangan Limbah Radioaktif

- Reaktor seperti SFR dan MSR dapat menggunakan limbah nuklir sebagai bahan bakar, mengurangi volume dan bahaya limbah radioaktif.
- Limbah yang dihasilkan memiliki waktu paruh lebih pendek, sehingga lebih aman untuk disimpan.

3. Keamanan yang Lebih Baik

- Reaktor Generasi IV dirancang dengan sistem keamanan pasif, yang berarti mereka dapat mendinginkan diri secara alami tanpa memerlukan listrik atau intervensi manusia.

- Risiko kecelakaan seperti meltdown (lelehan inti reaktor) diminimalkan.

4. Pemanfaatan Bahan Bakar yang Optimal

- Reaktor Generasi IV dapat menggunakan bahan bakar nuklir yang lebih beragam, termasuk uranium-238 dan thorium, yang lebih melimpah di alam daripada uranium-235.
- Ini mengurangi ketergantungan pada bahan bakar nuklir yang langka.

5. Tahan Proliferasi

- Desain reaktor Generasi IV membuatnya lebih sulit untuk digunakan dalam produksi senjata nuklir.
- Bahan bakar yang digunakan tidak mudah diubah menjadi bahan senjata.

6. Aplikasi Multiguna

- Selain menghasilkan listrik, reaktor Generasi IV dapat digunakan untuk:
 - Memproduksi hidrogen sebagai bahan bakar alternatif.
 - Menyediakan panas untuk industri.
 - Mendukung desalinasi air laut.

D. Tantangan Pengembangan PLTN Generasi IV

Meskipun menjanjikan, pengembangan PLTN Generasi IV menghadapi beberapa tantangan:

1. Biaya Pengembangan yang Tinggi

- Teknologi ini masih dalam tahap penelitian dan pengembangan, sehingga memerlukan investasi besar.

2. Kompleksitas Desain

- Reaktor Generasi IV menggunakan bahan dan sistem yang lebih kompleks, seperti pendingin logam cair atau garam cair.

3. Regulasi dan Keamanan

- Perlu standar keamanan baru untuk memastikan reaktor ini aman dioperasikan.

4. Waktu Pengembangan yang Lama

- Diperkirakan reaktor Generasi IV baru akan siap digunakan secara komersial pada tahun 2030-2040.

E. Contoh Proyek PLTN Generasi IV

Beberapa proyek PLTN Generasi IV yang sedang dikembangkan:

- China: Mengembangkan reaktor HTR-PM (*Very High-Temperature Reactor*).
- Rusia: Sudah mengoperasikan reaktor BN-800 (*Sodium-Cooled Fast Reactor*).
- Amerika Serikat: Meneliti reaktor *Molten Salt Reactor* untuk aplikasi komersial.
- Prancis: Mengembangkan reaktor ASTRID (*Sodium-Cooled Fast Reactor*).

PLTN Generasi IV adalah teknologi masa depan yang menjanjikan solusi energi bersih, aman, dan berkelanjutan. Dengan efisiensi tinggi, pengurangan limbah radioaktif, dan keamanan yang lebih baik, reaktor ini berpotensi menjadi tulang punggung sistem energi global di masa depan. Meskipun masih dalam tahap pengembangan, PLTN Generasi IV diharapkan dapat mengubah cara kita memanfaatkan energi nuklir untuk kebaikan manusia dan lingkungan.

6.2. Fusi Nuklir

Fusi nuklir adalah proses penggabungan inti ringan (seperti hidrogen) menjadi inti yang lebih berat (seperti helium), melepaskan energi dalam jumlah besar.

Prinsip Dasar Fusi:

- Reaksi fusi memerlukan suhu sangat tinggi (≈ 150 juta $^{\circ}\text{C}$) untuk mengatasi gaya tolak-menolak inti atom.
- Contoh reaksi fusi:
(Deuterium + Tritium \rightarrow Helium + Neutron + Energi)

6.2.1 Proyek Fusi Nuklir Terkini:

1. ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*):
 - Lokasi: Cadarache, Prancis.
 - Tujuan: Membuktikan kelayakan fusi nuklir sebagai sumber energi.
 - Teknologi: Tokamak (reaktor berbentuk donat dengan medan magnet kuat).
 - Target: Menghasilkan 500 MW energi dari input 50 MW.
2. SPARC (*MIT dan Commonwealth Fusion Systems*):
 - Tujuan: Membangun reaktor fusi komersial skala kecil.
 - Teknologi: Magnet superkonduktor suhu tinggi.
 - Target: Operasional pada tahun 2030.

Keunggulan Fusi Nuklir:

- Bahan bakar melimpah (deuterium dari air laut, litium untuk tritium).
- Tidak menghasilkan limbah radioaktif tingkat tinggi.
- Aman: Reaksi fusi tidak dapat lepas kendali.

6.2.2 Integrasi dengan Energi Terbarukan

PLTN dapat berperan penting dalam sistem energi terbarukan dengan menyediakan pasokan listrik yang stabil dan bebas emisi.

Sinergi PLTN dan Energi Terbarukan:

1. Stabilitas Jaringan Listrik:

- PLTN menyediakan pasokan listrik dasar (baseload), sementara energi terbarukan (surya, angin) bersifat intermiten.
- Contoh: Di Prancis, PLTN dan energi terbarukan bekerja sama untuk mencapai target net-zero emission.

2. Produksi Hidrogen Hijau:

- PLTN dapat menyediakan panas dan listrik untuk elektrolisis air, menghasilkan hidrogen tanpa emisi CO₂.
- Contoh: Proyek HTGR di Jepang untuk produksi hidrogen skala industri.

3. Desalinasi Air Laut:

- PLTN dapat digunakan untuk memproduksi air tawar melalui desalinasi, terutama di daerah kering.
- Contoh: PLTN di Uni Emirat Arab menyediakan listrik dan air tawar untuk kota-kota pesisir.

Contoh PLTN dan Transisi Energi

1. Tiongkok:

- Mengembangkan PLTN dan energi terbarukan secara simultan untuk mengurangi ketergantungan pada batubara.
- Target: 150 GW kapasitas nuklir dan 1.200 GW energi terbarukan pada 2030.

2. Amerika Serikat:

- Mendorong PLTN generasi kecil (SMR) untuk menggantikan pembangkit batubara.
- Contoh: Proyek NuScale Power di Idaho.

3. Uni Eropa:

- Mengakui PLTN sebagai bagian dari taksonomi hijau (*green taxonomy*) untuk investasi berkelanjutan.

Energi nuklir memiliki potensi besar untuk mendukung transisi energi global menuju sistem yang lebih bersih dan berkelanjutan. Dengan teknologi reaktor Generasi IV, fusi nuklir, dan integrasi dengan energi terbarukan, PLTN dapat menjadi pilar penting dalam mencapai target net-zero emission dan ketahanan energi global.

6.3 Reaktor Modular Kecil (SMR) dan Mikro-Reaktor: Nuklir Fleksibel dan Terjangkau

Small Modular Reactor (SMR) adalah reaktor nuklir berukuran kecil (kurang dari 300 MW) yang lebih fleksibel dan lebih murah dibandingkan PLTN besar.

Mikro-reactor lebih kecil lagi, dengan kapasitas di bawah 10 MW, cocok untuk daerah terpencil atau aplikasi industri tertentu.

Keunggulan SMR dan Mikro-Reaktor:

- Lebih murah dan cepat dibangun – Bisa dibuat secara fabrikasi dan dirakit di lokasi.
- Lebih aman – Desainnya memungkinkan *shutdown* otomatis tanpa intervensi manusia.
- Cocok untuk wilayah terpencil – Bisa digunakan di daerah yang sulit dijangkau jaringan listrik.

Tantangan SMR dan Mikro-Reaktor:

- Masih dalam tahap pengembangan – Hanya beberapa negara yang mulai mengujinya (AS, Kanada, Rusia).
- Regulasi belum siap – Banyak negara masih menyesuaikan kebijakan untuk teknologi ini.

Contoh Proyek SMR:

- NuScale (AS) – Salah satu desain SMR yang telah mendapatkan persetujuan dari otoritas nuklir AS.
- Bilibino (Rusia) – PLTN terapung dengan reaktor kecil untuk daerah Arktik.
- Rolls-Royce SMR (Inggris) – Dikembangkan untuk menggantikan PLTN besar di Inggris.

Prediksi Masa Depan: Dalam 10–20 tahun ke depan, SMR bisa menjadi solusi energi bersih untuk negara berkembang dan menggantikan PLTN konvensional di banyak negara.

6.4 Penggunaan AI dan Digital Twin dalam Operasi PLTN

Artificial Intelligence (AI) dan *Digital Twin* semakin banyak digunakan dalam industri energi nuklir untuk mengoptimalkan operasi, meningkatkan keamanan, dan mengurangi biaya pemeliharaan.

Apa itu *Digital Twin*? Digital Twin adalah kembaran digital dari reaktor nuklir yang memungkinkan simulasi *real-time*, pemantauan kinerja, dan deteksi dini masalah.

POTENSI PLTN DI INDONESIA

7.1. Potensi PLTN di Indonesia

1. Kebutuhan Energi yang Meningkat:

- Pertumbuhan ekonomi dan populasi meningkatkan permintaan listrik.
- Target bauran energi nasional: 23% energi terbarukan dan 6% nuklir pada 2025 (RUEN 2017).

2. Ketersediaan Bahan Bakar Nuklir:

- Cadangan uranium: \approx 81.000 ton (terutama di Kalimantan Barat).
- Cadangan thorium: \approx 140.000 ton (terutama di Bangka Belitung).

3. Diversifikasi Energi:

- PLTN dapat mengurangi ketergantungan pada energi fosil (batubara dan minyak).

7.2. Jenis PLTN Alternatif yang Sesuai

Berdasarkan kondisi geografis, ekonomi, dan teknologi, beberapa jenis PLTN yang cocok untuk Indonesia adalah:

1. Reaktor Modular Kecil (*Small Modular Reactor*/SMR):

- Kapasitas: 50-300 MW.
- Keunggulan:
 - Biaya investasi lebih rendah.
 - Cocok untuk daerah terpencil atau pulau kecil.

- Desain keselamatan pasif.
- Contoh: NuScale Power (AS), CAREM (Argentina).

2. Reaktor Berbasis Thorium:

- Bahan bakar: Thorium (lebih melimpah daripada uranium di Indonesia).
- Keunggulan:
 - Limbah radioaktif lebih sedikit.
 - Risiko proliferasi nuklir lebih rendah.
- o Contoh: Reaktor MSR (Molten Salt Reactor).

3. Reaktor Generasi III+:

- Kapasitas: 1.000-1.600 MW.
- Keunggulan:
 - Teknologi sudah teruji (contoh: AP1000, EPR).
 - Sistem keselamatan canggih.
- Tantangan: Biaya investasi tinggi ($\approx \$6-9$ miliar).

7.3. Regulasi dan Kebijakan PLTN di Indonesia

1. Dasar Hukum:

- UU No. 10/1997 tentang Ketenaganukliran: Mengatur penggunaan energi nuklir untuk tujuan damai.
- PP No. 43/2006 tentang Perizinan Reaktor Nuklir: Menetapkan persyaratan izin pembangunan dan operasi PLTN.
- RUEN (Rencana Umum Energi Nasional) 2017: Memasukkan PLTN dalam bauran energi nasional.

2. Badan Pengawas:

- BAPETEN (Badan Pengawas Tenaga Nuklir): Bertugas mengawasi keselamatan dan keamanan nuklir.
- BATAN (Badan Tenaga Nuklir Nasional): Bertanggung jawab atas penelitian dan pengembangan teknologi nuklir.

3. Tantangan Regulasi:

- Perlu penyempurnaan regulasi untuk mengakomodasi teknologi reaktor baru (SMR, thorium).

- Perlunya sosialisasi dan edukasi publik untuk meningkatkan penerimaan masyarakat.

7.4. Studi Kelayakan dan Lokasi Potensial

1. Studi Kelayakan:

- BATAN telah melakukan studi kelayakan PLTN sejak 1990-an.
- Lokasi potensial: Bangka Belitung, Kalimantan Barat, Jepara (Jawa Tengah).

2. Kriteria Lokasi:

- Jauh dari zona gempa aktif.
- Akses ke sumber air untuk pendinginan.
- Dukungan masyarakat lokal.



08

PENGOPERASI PLTN

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) merupakan salah satu sumber energi listrik yang memanfaatkan reaksi fisi nuklir untuk menghasilkan panas, yang kemudian dikonversi menjadi energi listrik. Pengoperasian PPLN memiliki beberapa tahapan utama, yaitu *start-up*, paralel ke jaringan listrik, operasi beban, dan shutdown. Dibandingkan dengan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar fosil, PPLN memiliki karakteristik operasi yang lebih kompleks dan memerlukan sistem keselamatan yang ketat. Artikel ini akan membahas secara komprehensif tata kelola pengoperasian PPLN dan membandingkannya dengan PLTU berbahan bakar fosil.

8.1. Tahapan Pengoperasian PPLN

8.1.1. *Start-Up* (Pengaktifan Awal)

Start-up PPLN merupakan proses yang memerlukan kontrol ketat untuk memastikan reaktor nuklir dapat bekerja secara stabil dan aman.

Tahapan ini meliputi:

- Pemeriksaan Keselamatan: Seluruh sistem reaktor, pendingin, dan bahan bakar diuji sebelum *start-up*.
- Penarikan Batang Kendali: Batang kendali secara bertahap ditarik untuk memulai reaksi fisi nuklir.
- Peningkatan Daya Reaktor: Daya reaktor ditingkatkan secara bertahap hingga mencapai kondisi operasi penuh.
- Waktu *Start-Up*: Proses ini dapat berlangsung selama beberapa hari hingga minggu untuk memastikan stabilitas dan keamanan.

8.1.2. Paralel ke Jaringan Listrik

Setelah daya reaktor mencapai tingkat yang cukup, listrik dari PLTN dapat disalurkan ke jaringan listrik.

Tahapan ini melibatkan:

- Sinkronisasi Tegangan dan Frekuensi: Generator harus disinkronkan dengan jaringan listrik agar dapat beroperasi secara efisien.
- Regulasi Daya: Pengaturan daya keluaran dilakukan dengan menyesuaikan laju fisi menggunakan batang kendali.
- Stabilitas Operasi: Setelah terhubung dengan jaringan, sistem dipantau untuk memastikan pasokan listrik tetap stabil.

8.1.3. Operasi Beban (*Operation Demand*)

PLTN didesain untuk beroperasi secara kontinu dengan daya keluaran yang stabil. Karakteristik operasinya meliputi:

- Keandalan Tinggi: PLTN dapat beroperasi selama 12-24 bulan sebelum perlu pemeliharaan.
- Efisiensi Energi Tinggi: PLTN memiliki efisiensi yang lebih baik dibandingkan PLTU berbahan bakar fosil.
- Pemantauan Ketat: Parameter keselamatan, suhu pendingin, dan proteksi radiasi harus terus diawasi.
- Keterbatasan Respons terhadap Beban: PLTN kurang fleksibel dalam menyesuaikan perubahan permintaan daya secara cepat.

8.1.4. Shutdown (Penghentian Operasi)

Penghentian operasi PLTN harus dilakukan dengan prosedur yang ketat untuk memastikan keselamatan. Proses *shutdown* meliputi:

Penurunan Daya Bertahap: Batang kendali dimasukkan kembali untuk memperlambat reaksi fisi.

Pendinginan Pasca-Operasi: Sistem pendinginan residual digunakan untuk menghilangkan panas sisa.

Cold Shutdown: Reaktor dianggap dalam kondisi aman setelah beberapa hari hingga minggu.

8.2. Perbandingan Pengoperasian PLTN dengan PLTU Fosil

Meskipun PLTN dan PLTU berbahan bakar fosil memiliki prinsip kerja yang serupa dalam mengubah energi panas menjadi energi listrik, terdapat beberapa perbedaan signifikan dalam pengoperasiannya.

8.2.1. Start-Up

Tabel 8 Perbedaan *startup* PLTN dan PLTU fosil

Aspek	PLTN	PLTU Fosil
Sumber Panas	Reaksi fisi nuklir	Pembakaran batu bara, minyak, atau gas
Proses	Pemeriksaan sistem, penarikan batang kendali, peningkatan daya bertahap	Pemanasan boiler, pembakaran bahan bakar
Waktu Start-Up	Beberapa hari hingga minggu	Beberapa jam hingga sehari

8.2.2. Paralel ke Jaringan Listrik

Tabel 9 Perbedaan sambungan paralel ke jaringan listrik

Aspek	PLTN	PLTU Fosil
Sinkronisasi Generator	Stabilitas tinggi, respon daya lambat	Fleksibel, bisa cepat menyesuaikan daya
Regulasi Daya	Menggunakan batang kendali	Mengatur jumlah bahan bakar

8.2.3. Operasi Beban

Tabel 10 Perbedaan operasi beban PLTN dan PLTU fosil

Aspek	PLTN	PLTU Fosil
Keandalan	Bisa beroperasi 12-24 bulan nonstop	Bergantung pada ketersediaan bahan bakar
Efisiensi	Lebih tinggi	Tergantung jenis bahan bakar
Fleksibilitas Beban	Kurang fleksibel	Lebih fleksibel mengikuti permintaan

8.2.4. Shutdown

Tabel 11 Perbedaan *shutdown* PLTN dan PLTU fosil

Aspek	PLTN	PLTU Fosil
Proses	Penurunan daya bertahap, pendinginan pasca-operasi	Penghentian pembakaran bahan bakar
Waktu	Beberapa hari hingga minggu	Beberapa jam

8.2.5. Keselamatan dan Dampak Lingkungan

Tabel 12 Keselamatan dan dampak lingkungan PLTN dan PLTU fosil

Aspek	PLTN	PLTU Fosil
Keselamatan	Risiko radiasi, sistem proteksi berlapis	Risiko ledakan boiler, polusi udara
Dampak Lingkungan	Tidak ada emisi CO ₂ , limbah radioaktif perlu penyimpanan khusus	Emisi CO ₂ tinggi, polusi udara, pemanasan global

PLTN dan PLTU berbahan bakar fosil memiliki keunggulan dan tantangan masing-masing. PLTN lebih unggul dalam efisiensi energi, kestabilan pasokan listrik, dan minim emisi karbon, tetapi memiliki tantangan dalam fleksibilitas operasional dan pengelolaan limbah radioaktif. Di sisi lain, PLTU berbahan bakar fosil lebih fleksibel dalam menyesuaikan beban listrik, tetapi memiliki dampak lingkungan yang lebih besar akibat emisi karbon dan polusi udara.

Pengelolaan operasional PLTN memerlukan standar keselamatan yang sangat tinggi untuk menghindari potensi risiko radiasi, sedangkan PLTU harus dikelola dengan baik untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Dengan meningkatnya kebutuhan akan energi bersih, pengembangan teknologi PLTN yang lebih aman dan efisien menjadi tantangan sekaligus peluang bagi masa depan pembangkitan listrik dunia.

09

MANAJEMEN PEMELIHARAAN DAN KEANDALAN PLTN

Pengoperasian Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) memerlukan sistem pemeliharaan dan keandalan yang ketat untuk memastikan keselamatan, efisiensi, serta keberlanjutan operasional. Manajemen pemeliharaan (Maintenance Management), perencanaan kerja (Work Planning), dan pengendalian kerja (Work Controlling) di PLTN harus mematuhi standar internasional seperti International Atomic Energy Agency (IAEA) dan Institute of Nuclear Power Operations (INPO). Selain itu, penerapan manajemen keandalan (Reliability Management) sangat penting untuk mengurangi risiko kegagalan peralatan dan menjaga stabilitas pembangkitan listrik nuklir.

9.1. Manajemen Pemeliharaan di PLTN

Manajemen pemeliharaan di PLTN bertujuan untuk mencegah gangguan operasional, meningkatkan efisiensi sistem, serta mengurangi kemungkinan kegagalan yang dapat mempengaruhi keselamatan.

9.1.1. Jenis Pemeliharaan di PLTN

1. *Preventive Maintenance* (PM - Pemeliharaan Pencegahan)
 - Inspeksi berkala, pelumasan, kalibrasi, dan penggantian suku cadang sebelum terjadi kegagalan.
2. *Predictive Maintenance* (PdM - Pemeliharaan Prediktif)
 - Menggunakan pemantauan kondisi peralatan (analisis getaran, termografi, dan analisis pelumas) untuk memprediksi kegagalan.

3. *Corrective Maintenance* (CM - Pemeliharaan Korektif)
 - Dilakukan setelah kegagalan terdeteksi untuk mengembalikan fungsi sistem.
4. *Reliability-Centered Maintenance* (RCM - Pemeliharaan Berbasis Keandalan)
 - Analisis risiko terhadap komponen kritis untuk menentukan strategi pemeliharaan yang paling efektif.

9.1.2. Perencanaan dan Pengendalian Kerja di PLTN

Perencanaan dan pengendalian kerja bertujuan untuk memastikan semua aktivitas pemeliharaan berjalan sesuai standar keselamatan dan efisiensi.

***Work Planning* (Perencanaan Kerja)**

1. Identifikasi Pekerjaan: Menggunakan Computerized Maintenance Management System (CMMS) untuk mencatat dan mengelola pemeliharaan.
2. Penjadwalan dan Alokasi Sumber Daya: Mengkoordinasikan tenaga kerja, suku cadang, dan alat yang dibutuhkan.
3. Pembuatan Paket Pekerjaan: Berisi instruksi teknis, diagram sistem, dan daftar alat yang dibutuhkan.

***Work Controlling* (Pengendalian Kerja)**

1. Eksekusi Pekerjaan: Pemeliharaan dilakukan sesuai prosedur dan standar keselamatan.
2. Pemantauan dan Dokumentasi: Memastikan pekerjaan berlangsung sesuai jadwal dan mendokumentasikan hasilnya.
3. Evaluasi Pasca-Pemeliharaan: Analisis efektivitas pekerjaan dan pengkajian ulang prosedur jika ditemukan ketidaksesuaian.

9.2. Manajemen Keandalan di PLTN

Manajemen keandalan di PLTN bertujuan untuk meningkatkan kinerja sistem, mengurangi risiko kegagalan, dan meningkatkan keselamatan operasional.

1. Pendekatan Berbasis Risiko (*Risk-Based Approach*)
 - *Probabilistic Risk Assessment* (PRA) digunakan untuk menilai risiko kegagalan sistem.
 - *Defense-in-Depth* diterapkan untuk menerapkan sistem keamanan berlapis dalam mencegah kegagalan.

2. Metodologi Manajemen Keandalan

Monitoring dan Evaluasi Kinerja Sistem:

- *Key Performance Indicators (KPI)* seperti *Mean Time Between Failures (MTBF)* dan *Mean Time To Repair (MTTR)* digunakan untuk mengukur efektivitas sistem.
- Pemantauan kondisi sistem pendingin reaktor, turbin, dan kelistrikan.

Work Management Process (WMP):

- *Work Screening and Prioritization:* Klasifikasi pekerjaan berdasarkan dampaknya terhadap keselamatan.
- *Scoping dan Planning:* Penentuan lingkup pekerjaan dan sumber daya yang dibutuhkan.
- *Scheduling dan Execution:* Jadwal pemeliharaan disusun berdasarkan prioritas risiko.

9.3. Penerapan Teknologi dalam Manajemen Pemeliharaan dan Keandalan

Digital Twin dan Artificial Intelligence (AI)

- Simulasi berbasis *Digital Twin* untuk memprediksi kondisi sistem secara *real-time*.
- AI dan *Machine Learning* digunakan untuk analisis data operasional dan rekomendasi pemeliharaan prediktif.

Otomatisasi dan Robotika

- Robot inspeksi digunakan untuk mengevaluasi kondisi peralatan di area radiasi tinggi.
- *Automated diagnostics* diterapkan untuk mendeteksi anomali sistem secara otomatis.

9.4. Evaluasi dan Peningkatan Berkelanjutan

Root Cause Analysis (RCA)

Mengidentifikasi akar penyebab kegagalan dan mengembangkan solusi jangka panjang.

Continuous Improvement Process (CIP)

Meningkatkan efektivitas prosedur pemeliharaan melalui evaluasi kinerja dan implementasi teknologi baru.

Manajemen pemeliharaan dan keandalan di PLTN merupakan aspek penting dalam menjamin keselamatan, efisiensi, dan ketersediaan pembangkit listrik nuklir. Dengan penerapan *Risk-Based Maintenance*, *Predictive Maintenance*, dan *Digital Twin*, PLTN dapat beroperasi lebih stabil dan andal. Evaluasi berkelanjutan serta pemanfaatan teknologi canggih juga memainkan peran penting dalam meningkatkan efektivitas manajemen keandalan.

9.5. *Maintenance Prioritization Index (MPI)* pada Peralatan PLTN

Maintenance Prioritization Index (MPI) adalah metode yang digunakan untuk menentukan prioritas pemeliharaan peralatan di Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Sistem ini bertujuan untuk memastikan bahwa sumber daya pemeliharaan dialokasikan secara optimal guna menjaga keandalan operasional, keselamatan nuklir, dan efisiensi biaya.

MPI digunakan dalam *Work Management Process (WMP)* dan dikembangkan untuk mengevaluasi kebutuhan perawatan terhadap urgensi, dampak keselamatan, serta efektivitas biaya peralatan tertentu.

A. Faktor Penentu MPI dalam PLTN

MPI ditentukan berdasarkan beberapa kriteria utama yang mencakup aspek teknis, operasional, dan keselamatan, di antaranya:

- 1. Dampak Keselamatan (*Safety Impact*)**
 - Apakah peralatan memiliki fungsi keselamatan yang kritis?
 - Apakah kegagalan peralatan dapat menyebabkan *shutdown* reaktor atau risiko radiasi?
- 2. Keterkaitan dengan Regulasi (*Regulatory Compliance*)**
 - Apakah peralatan berhubungan dengan persyaratan teknis atau regulasi dari IAEA dan badan pengawas nasional?
 - Apakah diperlukan tindakan pemeliharaan untuk memastikan kepatuhan terhadap standar keselamatan nuklir?

3. Dampak pada Keandalan Sistem (*Reliability Impact*)

- Seberapa sering peralatan mengalami kegagalan dalam beberapa siklus operasi terakhir?
- Apakah komponen ini mempengaruhi sistem utama PLTN (misalnya sistem pendinginan inti, kontrol reaktor, atau turbin utama)?

4. Urgensi dan Risiko Ekonomi (*Economic Risk and Urgency*)

- Berapa biaya jika terjadi kegagalan peralatan?
- Apakah ada suku cadang yang tersedia atau waktu tunggu pengadaan yang lama?

B. Skema Prioritas dalam MPI

Tabel berikut menunjukkan bagaimana sistem MPI mengklasifikasikan prioritas pekerjaan pemeliharaan di PLTN berdasarkan dampak dan urgensinya.

Tabel 13 Skema prioritas pekerjaan pemeliharaan PLTN

Prioritas	Kategori	Kriteria Evaluasi	Contoh Peralatan
1 (Kritis)	Risiko Keselamatan Tinggi	Kegagalan dapat menyebabkan kecelakaan nuklir atau shutdown darurat.	Sistem Pendingin Darurat, Batang Kendali
2 (Tinggi)	Regulasi dan Dampak Operasional	Berdampak pada regulasi dan efisiensi sistem utama.	Turbin Utama, Generator Listrik
3 (Sedang)	Keandalan Sistem	Berdampak pada performa tetapi tidak langsung menyebabkan risiko keselamatan.	Pompa Air Umpam, Katup Kontrol
4 (Rendah)	Dampak Ekonomi atau Non-Kritis	Tidak memengaruhi operasi utama tetapi memerlukan perbaikan preventif.	HVAC, Sistem Penerangan

MPI membantu *Work Management Process* (WMP) dalam menentukan urutan kerja dan alokasi sumber daya pemeliharaan sesuai dengan risiko dan urgensi.

C. Implementasi MPI dalam *Work Management Process* (WMP)

Untuk menerapkan MPI secara efektif, PLTN menggunakan proses berikut:

1. Identifikasi dan Klasifikasi Pekerjaan

- Setiap permintaan pemeliharaan dievaluasi berdasarkan tabel skema prioritas.
- Komite *Work Screening* melakukan analisis dampak dan menentukan urgensi.

2. Penjadwalan dan Pengalokasian Sumber Daya

- Peralatan dengan nilai MPI tertinggi mendapat prioritas dalam jadwal pemeliharaan.
- Penjadwalan dilakukan dalam *Work Execution Window* (misalnya, satu bulan sebelum eksekusi pemeliharaan).

3. Monitoring dan Evaluasi

- Evaluasi pasca-pemeliharaan dilakukan untuk menilai efektivitas tindakan yang diambil.
- Indikator Kinerja Utama (KPI) seperti *Mean Time Between Failures* (MTBF) dan *Mean Time To Repair* (MTTR) digunakan untuk menilai efektivitas sistem MPI.

Maintenance Prioritization Index (MPI) adalah alat penting dalam manajemen pemeliharaan PLTN yang memastikan alokasi sumber daya pemeliharaan dilakukan dengan efektif dan efisien. Dengan pendekatan berbasis risiko dan keselamatan, MPI mendukung *Work Management Process* (WMP) dalam meningkatkan keandalan sistem dan memastikan kepatuhan terhadap standar keselamatan nuklir.

Peralatan PLTN Berdasarkan Maintenance Prioritization Index

Tabel berikut menunjukkan daftar peralatan di Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) berdasarkan nilai *Maintenance Prioritization Index* (MPI). Setiap peralatan diberi nilai berdasarkan dampak keselamatan, keandalan, dan operasionalnya.

Tabel 14 Daftar Peralatan PLTN berdasarkan *Maintenance Prioritization Index*

Kategori Prioritas	Nama Peralatan	Fungsi Utama	Dampak jika Gagal	Nilai MPI (0-10)
Prioritas 1 (Kritis)	Emergency Core Cooling System (ECCS)	Pendinginan darurat reaktor	Risiko pelelehan inti reaktor (meltdown)	10
	High-Pressure Coolant Injection (HPCI)	Injeksi air pendingin tekanan tinggi	Kegagalan pendinginan inti	9.5
	Control Rod Drive System (CRDS)	Pengendalian reaktivitas reaktor	Reaktor tidak dapat dimatikan dengan aman	9.5
	Emergency Diesel Generator (EDG)	Sumber listrik cadangan darurat	Kehilangan daya untuk keselamatan	9.3
	Radiation Monitoring System (RMS)	Pemantauan tingkat radiasi	Kegagalan deteksi kebocoran radiasi	9.0
Prioritas 2 (Tinggi)	Turbine Control System	Mengatur daya keluaran listrik	Fluktuasi daya reaktor	8.8
	Steam Generator Feedwater Pump	Memasok air umpan untuk steam generator	Ketidakseimbangan uap dan air	8.5
	Main Steam Isolation Valve (MSIV)	Mengontrol aliran uap dari reaktor	Kehilangan kontrol tekanan reaktor	8.3
	Boric Acid Injection System	Pengendalian reaktivitas dengan asam borat	Kegagalan kontrol daya reaktor	8.2
	Reactor Coolant Pump	Sirkulasi pendingin primer	Overheating reaktor	8.0
Prioritas 3 (Sedang)	Primary Coolant Loop Heat Exchanger	Pendinginan reaktor utama	Efisiensi pendinginan berkurang	7.5
	Condenser Vacuum Pump	Meningkatkan efisiensi kondensasi	Efisiensi turbin menurun	7.0
	Safety-Related Batteries	Cadangan daya sistem keselamatan	Kehilangan daya kontrol darurat	6.8
	Fire Protection System	Pencegahan kebakaran di area kritis	Potensi kebakaran yang merusak kontrol	6.5
	Chemical Injection System	Pemeliharaan kualitas air pendingin	Korosi sistem pendingin	6.2
Prioritas 4 (Rendah)	HVAC System for Control Room	Pendinginan ruang kendali utama	Overheating di ruang kendali	5.5
	Non-Essential Service Water Pumps	Suplai air untuk sistem non-kritis	Tidak berdampak langsung pada operasi	5.0
	Lubrication System for Turbine Bearings	Pelumasan bantalan turbin	Peningkatan gesekan dan keausan	4.8
	Lighting System in Reactor Building	Penerangan di gedung reaktor	Gangguan visual bagi operator	4.5

Catatan :

- Peralatan dengan MPI 9.0-10 memiliki dampak langsung terhadap keselamatan reaktor dan harus menjadi prioritas utama dalam pemeliharaan.
- Peralatan dengan MPI 8.0-8.9 memiliki pengaruh besar terhadap operasional dan efisiensi PLTN tetapi tidak menyebabkan kegagalan keselamatan langsung.
- Peralatan dengan MPI 6.0-7.9 masih berpengaruh pada stabilitas sistem tetapi memiliki risiko lebih rendah dibanding kategori di atas.
- Peralatan dengan MPI 4.0-5.9 memiliki dampak minimal dan masuk dalam kategori pemeliharaan rutin tanpa risiko operasional besar.

Data ini membantu PLTN dalam mengalokasikan sumber daya pemeliharaan berdasarkan tingkat urgensi dan risiko.

10

INTEGRASI PLTN DENGAN ENERGI TERBARUKAN

Dalam transisi menuju sistem energi rendah karbon, integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) dengan energi terbarukan seperti surya dan angin menjadi strategi kunci. PLTN memiliki keunggulan sebagai sumber daya bebas emisi karbon yang stabil, sementara energi terbarukan menawarkan fleksibilitas dan sumber daya yang tidak terbatas. Namun, tantangan seperti stabilitas grid dan intermittency harus diatasi untuk menciptakan sistem energi yang andal.

10.1. Peran PLTN dalam Sistem Energi Rendah Karbon

10.1.1. PLTN sebagai *Baseline Power* (Beban Dasar)

- PLTN dapat beroperasi 24/7 dengan faktor kapasitas tinggi (>90%), menjadikannya andalan untuk suplai listrik yang stabil.
- Berbeda dengan energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin yang bersifat intermiten, PLTN tidak tergantung pada kondisi cuaca.
- PLTN membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan meminimalkan emisi karbon.

Tabel 15 Perbandingan Emisi Karbon

Sumber Energi	Emisi CO ₂ (g/kWh)
Batu Bara	800–1.000
Gas Alam	400–500
Nuklir	10–15
Angin	10–20
Surya (PV)	30–50
Hidro	5–15

10.2 Konsep *Hybrid Energy System: PLTN + Energi Terbarukan + Penyimpanan Hidrogen*

Untuk meningkatkan efisiensi dan fleksibilitas sistem energi, konsep *hybrid energy system* mulai dikembangkan.

PLTN + Tenaga Surya + Hidrogen: Kombinasi Optimal?

Sistem ini menggabungkan: PLTN sebagai beban dasar untuk memastikan suplai listrik stabil. Energi surya atau angin sebagai sumber daya tambahan saat tersedia. Elektrolisis hidrogen sebagai penyimpanan energi ketika produksi listrik berlebih.

Contoh Implementasi:

1. H2@Scale (AS): Memanfaatkan listrik PLTN untuk produksi hidrogen bersih.
2. *Demo Project EDF* (Prancis): Menggabungkan PLTN dengan penyimpanan hidrogen dan tenaga surya.

Keuntungan sistem hybrid:

- Efisiensi tinggi: PLTN tetap beroperasi pada kapasitas optimal tanpa perlu sering diatur ulang.
- Stabilitas *grid* lebih baik: Hidrogen dapat digunakan sebagai cadangan energi.
- Integrasi energi bersih: Mengurangi kebutuhan bahan bakar fosil dalam jangka panjang.

10.3. Tantangan *Grid Stability* dan *Intermittency*

Meskipun integrasi PLTN dan energi terbarukan memiliki banyak keuntungan, ada beberapa tantangan yang harus diselesaikan:

Tantangan 1: Stabilitas Grid

- PLTN sulit untuk dioperasikan secara fleksibel karena biasanya dirancang untuk berjalan pada daya penuh secara terus-menerus.
- Energi terbarukan seperti angin dan matahari memiliki fluktuasi besar, sehingga bisa menyebabkan ketidakseimbangan daya dalam jaringan listrik.

Solusi:

- *Pumped Storage Hydropower* (PSH) – Penyimpanan energi menggunakan air sebagai baterai raksasa.
- Baterai skala besar – Teknologi seperti baterai *lithium-ion* dan *flow battery* bisa membantu menyerap surplus energi.

Tantangan 2: Mode Pembebaan Operasi PLTN

Untuk mendukung grid yang dinamis, PLTN harus bisa menyesuaikan produksinya sesuai permintaan. Beberapa mode operasi yang dapat diterapkan dijelaskan di tabel berikut:

Tabel 16 Mode Pembebaan Operasi PLTN

Mode Pembebaan	Deskripsi	Tantangan
Baseload Mode	Beroperasi konstan pada daya maksimum.	Tidak fleksibel dalam mengikuti fluktuasi permintaan.
Load Following Mode	Menyesuaikan daya keluaran mengikuti perubahan permintaan listrik.	PLTN konvensional tidak dirancang untuk operasi dinamis.
Hybrid Mode	Mengalihkan surplus listrik untuk produksi hidrogen atau penyimpanan lainnya.	Membutuhkan infrastruktur tambahan.

Solusi Teknologi:

- Reaktor modular kecil (*Small Modular Reactor*/SMR) lebih fleksibel dibandingkan PLTN besar.
- Sistem *Advanced Load Following* seperti yang dikembangkan di Prancis dan AS.

PLTN memainkan peran penting dalam sistem energi rendah karbon dengan menyediakan daya stabil untuk melengkapi energi terbarukan. *Hybrid energy system* (PLTN + energi terbarukan + hidrogen) dapat menjadi solusi optimal untuk mengatasi *intermittency* dan efisiensi energi. Tantangan stabilitas grid dan fleksibilitas operasi PLTN dapat diatasi dengan penyimpanan energi, reaktor modular kecil (SMR), dan sistem *load-following* yang lebih canggih.

PLTN bukan pesaing energi terbarukan, tetapi mitra strategis dalam menciptakan sistem energi bersih yang lebih stabil dan berkelanjutan.



ASPEK SKILL DAN KOMPETENSI SDM UNTUK PLTN

Indonesia sedang mempersiapkan diri untuk memasuki era energi nuklir dengan rencana pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Meskipun tantangan ada, Indonesia memiliki modal dasar yang kuat, termasuk instansi yang kompeten, reaktor riset seperti Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) di Serpong, serta pengalaman PT PLN (Persero) dalam mengelola pembangkit listrik konvensional. Dengan memanfaatkan pengalaman PLN dan meningkatkan kemampuan SDM di bidang pembangkitan, Indonesia dapat memastikan kesiapan yang optimal untuk pembangunan dan operasi PLTN. Berikut adalah ulasan komprehensif mengenai kesiapan SDM, kompetensi yang dibutuhkan, serta langkah-langkah strategis untuk memastikan kesiapan Indonesia.

11.1. Modal Dasar dan Potensi Indonesia

Reaktor Riset yang Ada

Indonesia telah memiliki Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) di Serpong, yang dioperasikan oleh Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN). Reaktor ini dapat menjadi *platform* awal untuk pelatihan dan pengembangan SDM dalam bidang nuklir. Selain itu, reaktor riset lain seperti Reaktor Kartini di Yogyakarta juga dapat dimanfaatkan untuk pendidikan dan pelatihan dasar.

Pengalaman PLN dalam Pembangkitan

PT PLN (Persero) memiliki pengalaman puluhan tahun dalam mengelola pembangkit listrik konvensional, seperti PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap),

PLTG (Pembangkit Listrik Tenaga Gas), dan PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air). Pengalaman ini dapat menjadi fondasi untuk mengembangkan kompetensi SDM dalam mengoperasikan PLTN, terutama dalam hal manajemen pembangkitan, pemeliharaan, dan operasional sistem kelistrikan.

Instansi yang Kompeten

Indonesia memiliki instansi yang berkompeten di bidang nuklir, seperti:

- BATAN/BRIN: Bertanggung jawab atas penelitian dan pengembangan teknologi nuklir.
- BAPETEN: Badan pengawas yang bertugas mengatur keselamatan dan keamanan nuklir.
- Instansi terkait

Infrastruktur Pendidikan

Beberapa universitas terkemuka di Indonesia, antara lain seperti Institut Teknologi Bandung (ITB), Universitas Gadjah Mada (UGM), dan Universitas Indonesia (UI), IT PLN serta Perguruan Tinggi lain yang telah memiliki program studi/Materi pelajaran energi nuklir. Ini menjadi modal penting untuk menghasilkan SDM yang kompeten.

11.2. Operasi PLTN, Kompetensi Teknis

- Pengetahuan Fisika Nuklir dan Reaktor: Memahami prinsip dasar fisika nuklir, reaksi fisi, dan termodinamika yang mendasari operasi reaktor.
- Operasi dan Kontrol Reaktor: Kemampuan mengoperasikan sistem reaktor, termasuk pengendalian reaksi berantai, sistem pendingin, dan sistem keselamatan.
- Manajemen Bahan Bakar Nuklir: Pengetahuan tentang siklus bahan bakar nuklir, dari pengisian hingga penanganan limbah radioaktif.
- Teknologi PLTN: Pemahaman tentang desain reaktor, seperti *Pressurized Water Reactor* (PWR) atau *Small Modular Reactor* (SMR), serta sistem pendukungnya.

Kompetensi Keselamatan dan Manajemen Risiko

Manajemen Keselamatan Nuklir: Kemampuan mengidentifikasi dan mengelola risiko keselamatan, termasuk pencegahan kecelakaan dan mitigasi dampak.

Prosedur Tanggap Darurat: Pemahaman tentang protokol tanggap darurat, termasuk evakuasi, dekontaminasi, dan koordinasi dengan pihak berwenang.

Proteksi Radiasi: Pengetahuan tentang prinsip proteksi radiasi dan penanganan limbah radioaktif.

Kompetensi Manajemen dan Kepemimpinan

- Manajemen Proyek: Kemampuan mengelola proyek besar, seperti konstruksi dan pengoperasian PLTN.
- Kepemimpinan dalam Situasi Kritis: Kemampuan memimpin tim dalam situasi darurat atau krisis.
- Komunikasi dan Kerja Tim: Keterampilan komunikasi yang baik untuk bekerja dengan tim multidisiplin dan berinteraksi dengan masyarakat.

Kompetensi Lingkungan dan Keberlanjutan

- Manajemen Dampak Lingkungan: Pemahaman tentang dampak lingkungan operasi PLTN dan upaya meminimalkannya.
- Keberlanjutan Energi Nuklir: Pengetahuan tentang peran energi nuklir dalam transisi energi bersih dan pengurangan emisi karbon.

Kompetensi Teknologi Informasi dan Keamanan Siber

- Sistem Kontrol dan Instrumentasi: Pemahaman tentang sistem kontrol digital dan analog dalam PLTN.
- Keamanan Siber: Pengetahuan tentang keamanan siber untuk melindungi sistem kontrol PLTN dari serangan digital.

11.3. Peningkatan Kemampuan SDM PLN untuk PLTN

Pemanfaatan Pengalaman PLN

- Manajemen Pembangkitan: SDM PLN yang berpengalaman dalam mengoperasikan pembangkit listrik konvensional dapat ditingkatkan kemampuannya untuk memahami sistem pembangkitan PLTN, terutama dalam hal manajemen energi, pemeliharaan, dan operasional.
- Sistem Transmisi dan Distribusi: Pengalaman PLN dalam mengelola sistem transmisi dan distribusi listrik dapat dimanfaatkan untuk mengintegrasikan PLTN ke dalam sistem kelistrikan nasional.

Program Pelatihan Khusus

- Pelatihan Operasi PLTN: PLN dapat mengadakan program pelatihan khusus untuk SDM-nya, bekerja sama dengan BATAN, BAPETEN, dan institusi internasional seperti IAEA.

- Magang di PLTN Luar Negeri: SDM PLN dapat dikirim untuk magang di PLTN yang sudah beroperasi di luar negeri, seperti di Korea Selatan, Jepang, atau Prancis.

Sertifikasi dan Lisensi

- Sertifikasi Operator PLTN: SDM PLN yang akan terlibat dalam operasi PLTN perlu mendapatkan sertifikasi dan lisensi dari BAPETEN, mengikuti standar internasional.

11.4. Langkah-Langkah Strategis untuk Mempersiapkan SDM

Pemanfaatan Reaktor Riset yang Ada

- Pelatihan Operator: Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) di Serpong dapat digunakan sebagai fasilitas pelatihan untuk calon operator PLTN.
- Penelitian dan Pengembangan: Reaktor riset ini juga dapat menjadi pusat penelitian untuk mengembangkan teknologi dan protokol keselamatan PLTN.

Penguatan Pendidikan dan Pelatihan

- Kurikulum Berbasis Kebutuhan: Universitas seperti ITB, UGM, dan UI dapat mengembangkan kurikulum yang lebih spesifik untuk operasi dan manajemen PLTN.
- Program Magang dan Sertifikasi: Kolaborasi dengan PLTN di luar negeri, seperti di Korea Selatan atau Jepang, dapat memberikan pengalaman magang dan sertifikasi internasional bagi SDM Indonesia.

Kerjasama Internasional

- Program IAEA: Indonesia dapat memanfaatkan program pelatihan dan workshop yang diselenggarakan oleh *International Atomic Energy Agency* (IAEA).
- Kerjasama Bilateral: Kerjasama dengan negara-negara seperti Korea Selatan, Jepang, atau Rusia dapat membantu dalam transfer teknologi dan pengetahuan.

Edukasi dan Sosialisasi kepada Masyarakat

- Kampanye Edukasi: Pemerintah dan lembaga terkait perlu mengadakan kampanye edukasi untuk meningkatkan pemahaman masyarakat tentang manfaat dan risiko PLTN.
- Transparansi dan Partisipasi Publik: Proses pembangunan PLTN harus transparan dan melibatkan partisipasi publik untuk membangun kepercayaan.

Investasi dalam Pengembangan SDM

- Beasiswa dan Program Pelatihan: Pemerintah perlu menyediakan beasiswa dan program pelatihan untuk calon operator dan insinyur nuklir.
- Pembangunan Pusat Pelatihan: Indonesia perlu membangun pusat pelatihan operator PLTN yang dilengkapi dengan simulasi reaktor nuklir.

Pembangunan PLTN Skala Kecil (SMR) sebagai Langkah Awal

- Small Modular Reactor (SMR): Indonesia dapat mempertimbangkan pembangunan PLTN skala kecil (SMR) sebagai langkah awal. SMR relatif lebih aman, fleksibel, dan membutuhkan investasi yang lebih kecil, sehingga cocok untuk negara yang baru memulai program nuklir.

Penguatan Kolaborasi Antar-Instansi

- Sinergi BATAN/BRIN, BAPETEN, dan PLN: Kolaborasi yang kuat antara BATAN, BAPETEN, dan PLN akan memastikan kesiapan teknis, regulasi, dan operasional dalam pembangunan PLTN.

Indonesia memiliki modal dasar yang kuat untuk mempersiapkan pembangunan dan operasi PLTN, termasuk reaktor riset yang ada, pengalaman PLN dalam pembangkitan, instansi yang kompeten, dan infrastruktur pendidikan. Dengan memanfaatkan pengalaman PLN dan meningkatkan kemampuan SDM di bidang pembangkitan, Indonesia dapat memastikan kesiapan yang optimal dalam memasuki era energi nuklir. Pembangunan PLTN skala kecil (SMR) dapat menjadi langkah awal yang strategis, sambil terus memperkuat kapasitas SDM dan regulasi. Dengan langkah-langkah ini, Indonesia tidak hanya akan memiliki PLTN yang aman dan efisien, tetapi juga berkontribusi pada ketahanan energi nasional dan transisi menuju energi bersih.



12

EKONOMI DAN PEMBIAYAAN PLTN

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) memiliki tantangan ekonomi yang signifikan, termasuk investasi awal yang besar, biaya operasi dan pemeliharaan yang kompleks, serta kebutuhan regulasi yang ketat. Oleh karena itu, memahami model pembiayaan, analisis biaya siklus hidup, dan skema pendanaan internasional menjadi kunci untuk keberhasilan pengembangan PLTN.

12.1. Model Pembiayaan PLTN

Model pembiayaan PLTN bergantung pada struktur kepemilikan dan tanggung jawab dalam pembangunan dan pengoperasian pembangkit. Berikut adalah beberapa model utama:

12.1.1 EPC (*Engineering, Procurement, and Construction*)

- Kontraktor bertanggung jawab atas desain teknik (*engineering*), pengadaan peralatan (*procurement*), dan pembangunan fisik (*construction*) PLTN.
- Pemilik (biasanya pemerintah atau perusahaan listrik negara) membayar proyek secara langsung atau melalui pinjaman jangka panjang.
- Contoh: PLTN Kudankulam di India yang dibangun oleh Rosatom Rusia dengan model EPC.

12.1.2 B00 (*Build-Own-Operate*)

- Investor swasta membangun, memiliki, dan mengoperasikan PLTN selama masa konsesi tertentu (misalnya 30–60 tahun).
- Pemerintah atau perusahaan listrik membeli listrik melalui perjanjian pembelian listrik jangka panjang (*Power Purchase Agreement/PPA*).
- Contoh: PLTN Akkuyu di Turki yang dibangun dengan skema B00 oleh Rosatom Rusia.

12.1.3 BOT (*Build-Operate-Transfer*)

- Mirip dengan B00, tetapi kepemilikan PLTN akan ditransfer ke pemerintah setelah masa kontrak selesai.
- Mengurangi risiko keuangan bagi negara, tetapi memerlukan investasi awal besar dari sektor swasta.
- Contoh: PLTN Barakah di Uni Emirat Arab, yang dibiayai dengan skema BOT dan didukung oleh dana dari Korea Selatan.

12.1.4 PPP (*Public-Private Partnership*)

- Kerjasama antara pemerintah dan swasta dalam pendanaan dan pengelolaan PLTN.
- Pemerintah biasanya memberikan insentif berupa jaminan pembelian listrik atau subsidi untuk mengurangi risiko investor.
- Contoh: Model ini diterapkan dalam proyek PLTN di Inggris (Hinkley Point C).

12.2 Analisis Biaya Siklus Hidup (LCOE) dan Perbandingan dengan Energi Terbarukan

12.2.1 Biaya Siklus Hidup PLTN (LCOE - *Levelized Cost of Electricity*)

LCOE adalah indikator biaya total pembangkitan listrik per megawatt-jam (MWh) selama umur operasional pembangkit.

Tabel 17 Biaya Siklus Hidup PLTN

Komponen Biaya PLTN	Estimasi Biaya
Capital Expenditure (Capex) (Investasi Awal)	USD 5.000 – 9.000/kW
Operational Expenditure (Opex) (Operasi dan Pemeliharaan)	USD 20 – 40/MWh
Bahan Bakar Nuklir	USD 7 – 15/MWh
Biaya Penonaktifan PLTN (Decommissioning)	USD 500 – 1.000/kW

Estimasi LCOE PLTN: USD 40 – 100/MWh, tergantung teknologi dan lokasi.

12.2.2 Perbandingan dengan Energi Terbarukan dan Fosil

Berikut adalah perbandingan LCOE beberapa sumber energi di dunia:

Tabel 18 Perbandingan LCOE beberapa sumber energi di dunia

Jenis Pembangkit	LCOE (USD/MWh)	Keunggulan	Kelemahan
PLTN	40 – 100	Bebas emisi karbon, stabil	Biaya awal tinggi, limbah nuklir
PLTU (Batu Bara)	50 – 100	Murah, stabil	Polusi tinggi, emisi CO ₂
PLTG (Gas Alam)	45 – 90	Fleksibel, emisi lebih rendah dari batu bara	Ketergantungan pasokan gas
PLTS (Surya)	20 – 50	Ramah lingkungan, modular	Intermiten (butuh baterai)
PLTB (Bayu/Angin)	30 – 60	Ramah lingkungan, biaya operasi rendah	Bergantung angin, perlu lahan luas
PLTA (Air)	30 – 80	Stabil, umur panjang	Dampak ekologi, biaya awal tinggi

- PLTN memiliki biaya awal (Capex) yang tinggi tetapi biaya operasional rendah.
- Energi terbarukan seperti surya dan angin lebih murah, tetapi tidak stabil tanpa penyimpanan energi.
- Gas alam lebih fleksibel tetapi tetap menghasilkan emisi karbon.

12.3. Skema Pendanaan Internasional untuk PLTN

12.3.1 Dana dan Pinjaman dari Lembaga Keuangan Internasional

Beberapa lembaga yang mendukung pendanaan PLTN:

- Bank Pembangunan Asia (ADB) -> Fokus pada proyek energi rendah karbon.
- Bank Dunia (*World Bank*) -> Tidak mendanai proyek PLTN sejak 1990-an karena isu sosial-politik.

- *European Investment Bank (EIB)* -> Memberikan pinjaman bagi negara-negara yang ingin membangun PLTN berstandar tinggi.

12.3.2 Dukungan dari Negara Pemilik Teknologi Nuklir

Negara yang memiliki industri nuklir maju sering menawarkan pinjaman dan investasi ke negara yang ingin membangun PLTN:

- Rusia (Rosatom) -> Menawarkan pembiayaan penuh dengan skema BOO/BOT (contoh: PLTN Akkuyu, Turki).
- China (CNNC) -> Aktif mendanai PLTN di Pakistan dan negara berkembang.
- Prancis (EDF) -> Menawarkan investasi dengan dukungan dari pemerintah Prancis.
- Jepang Dll.

12.3.3 Mekanisme Pendanaan Hijau (*Green Financing*)

Dengan meningkatnya fokus pada energi bersih, beberapa negara mencoba mengakses obligasi hijau (*Green Bonds*) dan pendanaan iklim untuk membangun PLTN:

- EU Green Taxonomy -> Mengakui PLTN sebagai energi rendah karbon yang dapat didanai melalui obligasi hijau.
- *Climate Bonds Initiative (CBI)* -> Beberapa proyek PLTN telah masuk dalam kategori energi bersih yang didanai oleh skema obligasi hijau.

12.3.4 Pendanaan dari Swasta dan Konsorsium Industri

Investor swasta juga mulai tertarik mendanai PLTN, terutama melalui model:

- *Public-Private Partnership (PPP)* -> Kemitraan antara negara dan swasta.
- *Corporate Financing* -> Perusahaan besar berinvestasi dalam proyek PLTN untuk menjamin pasokan listrik jangka panjang.

Model pembiayaan PLTN sangat beragam, mulai dari EPC, BOO, BOT, hingga PPP.

- Biaya siklus hidup (LCOE) PLTN berkisar USD 40 – 100/MWh, lebih tinggi dari energi terbarukan tetapi lebih stabil.
- Skema pendanaan internasional melibatkan pinjaman dari lembaga keuangan, dukungan negara pemilik teknologi, dan mekanisme pembiayaan hijau.

Beberapa alternatif:

- Menggunakan model BOO atau PPP untuk mengurangi beban fiskal negara.
- Mengakses pendanaan hijau dan obligasi hijau untuk mendapatkan pembiayaan yang lebih murah.
- Bekerjasama dengan negara pemilik teknologi untuk mendapatkan pinjaman lunak dan transfer teknologi.

Indonesia perlu strategi pembiayaan yang matang dan skema pendanaan yang inovatif untuk memastikan PLTN dapat dibangun secara efisien dan berkelanjutan.

12.4. Perbandingan Biaya pembangunan PLTN

Berikut adalah perbandingan biaya pembangunan (*Capex*), biaya operasi (*Opex*), dan harga listrik PLTN dengan pembangkit listrik lainnya, khususnya dalam konteks Indonesia. Data ini bersifat perkiraan dan dapat bervariasi tergantung pada lokasi, teknologi, dan faktor lainnya.

12.4.1 Biaya Pembangunan (*Capex*)

Biaya pembangunan mencakup investasi awal untuk membangun pembangkit listrik, termasuk pembelian peralatan, konstruksi, dan infrastruktur pendukung.

Tabel 19 Biaya Pembangunan

Jenis Pembangkit	Capex (USD/kW)	Keterangan
PLTN	4.000 - 6.000	Biaya tinggi karena teknologi canggih, sistem keamanan, dan konstruksi kompleks.
Batubara	1.500 - 2.500	Biaya lebih rendah karena teknologi yang sudah mapan.
Gas Alam	800 - 1.200	Biaya rendah karena konstruksi relatif sederhana.
PLTA (Hydro)	1.500 - 3.000	Biaya bervariasi tergantung pada skala dan lokasi.
Panas Bumi	2.500 - 4.000	Biaya tinggi karena eksplorasi dan pengeboran yang kompleks.
Surya (PV)	800 - 1.200	Biaya turun signifikan dalam beberapa tahun terakhir.
Angin (Wind)	1.200 - 1.800	Biaya bervariasi tergantung pada lokasi dan kecepatan angin.

Catatan untuk PLTN di Indonesia:

- Biaya *Capex* PLTN di Indonesia mungkin lebih tinggi karena kurangnya pengalaman lokal dan kebutuhan impor teknologi.
- Pembangunan PLTN pertama (*First-of-a-Kind/FOAK*) biasanya lebih mahal karena biaya pengembangan dan pembelajaran.

12.4.2 Biaya Operasi dan Pemeliharaan (*Opex*)

Biaya operasi mencakup biaya bahan bakar, pemeliharaan, dan personel.

Tabel 20 Biaya Operasi dan Pemeliharaan

Jenis Pembangkit	Opex (USD/MWh)	Keterangan
PLTN	20 – 30	Biaya operasi rendah karena efisiensi bahan bakar nuklir yang tinggi.
Batubara	30 – 40	Biaya bahan bakar relatif rendah, tetapi pemeliharaan tinggi.
Gas Alam	40 – 60	Biaya bahan bakar lebih tinggi, tetapi operasi fleksibel.
PLTA (Hydro)	10 – 20	Biaya operasi sangat rendah karena tidak memerlukan bahan bakar.
Panas Bumi	20 – 40	Biaya operasi bervariasi tergantung pada kondisi sumber daya.
Surya (PV)	10 – 20	Biaya operasi sangat rendah, tetapi pemeliharaan panel diperlukan.
Angin (Wind)	20 – 30	Biaya operasi rendah, tetapi pemeliharaan turbin diperlukan.

Catatan untuk PLTN di Indonesia:

- Biaya Opex PLTN relatif stabil karena bahan bakar nuklir (uranium) hanya menyumbang sebagian kecil dari total biaya operasi.
- Biaya pemeliharaan dan keamanan PLTN cukup tinggi karena standar keselamatan yang ketat.

12.4.3 Harga Listrik (*Levelized Cost of Electricity/LCOE*)

LCOE adalah biaya rata-rata untuk menghasilkan listrik selama masa operasi pembangkit, termasuk *Capex*, *Opex*, dan biaya lainnya.

Tabel 21 Biaya rata-rata untuk menghasilkan listrik melalui PLTN

Jenis Pembangkit	LCOE (USD/MWh)	Keterangan
PLTN	60 – 100	Biaya tinggi karena Capex besar, tetapi stabil dalam jangka panjang.
Batubara	50 – 80	Biaya rendah, tetapi tidak termasuk biaya eksternal (emisi CO ₂).
Gas Alam	70 – 100	Biaya bervariasi tergantung pada harga gas.
PLTA (Hydro)	40 – 80	Biaya rendah jika lokasi memungkinkan.
Panas Bumi	60 – 100	Biaya tinggi karena eksplorasi dan pengeboran.
Surya (PV)	40 – 60	Biaya turun signifikan dalam beberapa tahun terakhir.
Angin (Wind)	50 – 80	Biaya bervariasi tergantung pada lokasi.

Catatan untuk PLTN di Indonesia:

- LCOE PLTN di Indonesia mungkin lebih tinggi karena biaya FOAK dan kurangnya infrastruktur pendukung.

- Namun, dalam jangka panjang, PLTN dapat menjadi kompetitif karena biaya bahan bakar yang rendah dan stabilitas pasokan.

12.4.4 Perbandingan dengan Konteks Indonesia

- Batubara: Saat ini dominan di Indonesia karena biaya *Capex* dan *Opex* yang rendah, serta ketersediaan bahan bakar lokal. Namun, biaya eksternal (emisi CO₂ dan polusi) tidak dihitung.
- Gas Alam: Biaya bahan bakar tergantung pada harga gas, yang dapat fluktuatif.
- Energi Terbarukan (Surya, Angin, Panas Bumi): Biaya turun signifikan, tetapi intermitensi (ketergantungan pada cuaca) menjadi tantangan.
- PLTN: Biaya awal tinggi, tetapi dalam jangka panjang dapat menjadi pilihan yang kompetitif dan ramah lingkungan.

Catatan :

- PLTN memiliki biaya pembangunan (*Capex*) yang tinggi, tetapi biaya operasi (*Opex*) dan harga listrik (LCOE) yang stabil dalam jangka panjang.
- Batubara masih menjadi pilihan termurah di Indonesia, tetapi dengan dampak lingkungan yang besar.
- Energi Terbarukan seperti surya dan angin semakin kompetitif, tetapi memerlukan dukungan sistem penyimpanan energi untuk mengatasi intermitensi.
- PLTN dapat menjadi pilihan strategis untuk diversifikasi energi dan mengurangi emisi karbon, tetapi memerlukan investasi besar dan dukungan kebijakan yang kuat.

Dengan mempertimbangkan biaya dan manfaat, PLTN dapat menjadi bagian dari bauran energi Indonesia, terutama untuk memenuhi kebutuhan listrik yang stabil dan ramah lingkungan dalam jangka panjang.

Transformasi Strategis Sektor Energi Nuklir

dalam Era Artificial Intelligence



13

TEKNOLOGI DEKOMISIONING DAN PENGELOLAAN LIMBAH JANGKA PANJANG

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) tidak hanya memerlukan perencanaan dalam pembangunannya tetapi juga dalam proses penonaktifan atau dekomisioning serta pengelolaan limbah radioaktif jangka panjang. Tantangan utama yang dihadapi adalah keamanan radiasi, biaya tinggi, dan dampak lingkungan. Oleh karena itu, pemilihan metode dekomisioning yang tepat serta strategi penyimpanan dan pemrosesan limbah sangat penting bagi keberlanjutan energi nuklir.

13.1. Metode Dekomisioning PLTN

Dekomisioning adalah proses penghentian operasi reaktor nuklir secara permanen hingga kondisi aman. Proses ini memerlukan waktu puluhan tahun dan biaya yang sangat besar. Ada tiga metode utama yang digunakan dalam industri nuklir:

13.1.1 SAFSTOR (*Safe Storage*) – Penyimpanan Aman

- PLTN dinonaktifkan tetapi tidak langsung dibongkar.
- Reaktor dan struktur radioaktif dibiarkan dalam kondisi aman selama 30–60 tahun agar tingkat radiasi menurun secara alami.
- Setelah tingkat radiasi cukup rendah, fasilitas dibongkar dan dikelola dengan risiko yang lebih kecil.
- Kelebihan: Biaya lebih rendah karena dekontaminasi dilakukan bertahap.

- Kekurangan: Membutuhkan waktu sangat lama sebelum fasilitas bisa digunakan kembali.
- Contoh: PLTN Humboldt Bay (AS) menggunakan metode ini.

13.1.2 DECON (*Decontamination*) – Dekontaminasi Langsung

- Pembongkaran dan pembersihan fasilitas dilakukan segera setelah PLTN ditutup.
- Struktur radioaktif dihancurkan, dan limbahnya dikelola langsung.
- Kelebihan: Lahan dapat digunakan kembali dalam waktu lebih singkat.
- Kekurangan: Biaya tinggi karena harus mengelola limbah dengan kadar radiasi masih tinggi.
- Contoh: PLTN Maine Yankee (AS) berhasil didekomisioning dengan metode ini.

13.1.3 ENTOMB (*Entombment*) – Penyegeletan Permanen

- Struktur reaktor dikubur dengan material isolasi seperti beton atau timbal, sehingga radioaktivitas tidak menyebar.
- Kelebihan: Metode cepat dan murah, serta mengurangi risiko penyebaran radiasi.
- Kekurangan: Hanya cocok untuk reaktor kecil, tidak umum digunakan untuk PLTN skala besar.
- Contoh: Digunakan pada beberapa reaktor penelitian kecil.

13.2. Penyimpanan Limbah Radioaktif Tingkat Tinggi

Limbah radioaktif terdiri dari beberapa kategori berdasarkan tingkat radiasinya:

- Limbah tingkat rendah (*Low-Level Waste* – LLW): Sarung tangan, pakaian pelindung, filter air.
- Limbah tingkat menengah (*Intermediate-Level Waste* – ILW): Komponen reaktor, resin filter.
- Limbah tingkat tinggi (*High-Level Waste* – HLW): Bahan bakar nuklir bekas dari reaktor.

Limbah tingkat tinggi (HLW) mengandung lebih dari 95% total radioaktivitas dan harus dikelola dengan sangat hati-hati.

13.2.1 Penyimpanan Sementara (*Interim Storage*)

- Kolam Pendingin (*Spent Fuel Pools*): Bahan bakar bekas direndam dalam air untuk mendinginkan reaksi fisi yang tersisa.
- Penyimpanan Kering (*Dry Cask Storage*): Setelah cukup dingin, limbah disimpan dalam kontainer khusus yang tahan radiasi.

13.2.2 Penyimpanan Jangka Panjang – *Deep Geological Repository (DGR)*

Limbah radioaktif tingkat tinggi harus disimpan di lokasi geologi yang stabil selama puluhan ribu tahun agar tidak mencemari lingkungan.

Tabel 22 Penyimpanan Jangka Panjang Limbah Radioaktif

Fasilitas Penyimpanan	Negara	Karakteristik
Onkalo	Finlandia	Penyimpanan bawah tanah pertama di dunia, kedalaman 430 meter.
WIPP (Waste Isolation Pilot Plant)	AS	Menyimpan limbah nuklir dari fasilitas militer di garam bawah tanah.
CIGEO	Prancis	Akan menjadi repository geologi untuk limbah tingkat tinggi.
Forsmark	Swedia	Repository bawah laut untuk limbah nuklir jangka panjang.

Onkalo di Finlandia menjadi contoh terdepan dalam penyimpanan limbah jangka panjang dengan desain yang memastikan keamanan hingga 100.000 tahun.

13.3. Teknologi Transmutasi Limbah Nuklir

Selain penyimpanan, teknologi transmutasi sedang dikembangkan untuk mengurangi radioaktivitas limbah nuklir. Transmutasi mengubah isotop radioaktif dengan umur paruh panjang menjadi isotop yang lebih stabil atau dengan umur paruh lebih pendek.

13.3.1 Reaktor Cepat (*Fast Reactors*) untuk Daur Ulang Limbah

- Reaktor Natrium Cepat (*Sodium-Cooled Fast Reactor, SFR*) dapat menggunakan bahan bakar bekas dan mengubah isotop berbahaya menjadi energi baru.
- Contoh: Reaktor BN-800 di Rusia menggunakan bahan bakar dari limbah nuklir yang didaur ulang.

13.3.2 Teknologi ADS (*Accelerator-Driven System*)

- Menggunakan akselerator partikel untuk mempercepat reaksi transmutasi.
- Keunggulan: Mengurangi waktu penyimpanan limbah dari ribuan tahun menjadi ratusan tahun.
- Contoh: Proyek MYRRHA di Belgia mengembangkan ADS untuk menangani limbah nuklir.

Jika transmutasi berkembang lebih lanjut, masa depan pengelolaan limbah nuklir akan menjadi lebih efisien dan aman.

- Dekomisioning PLTN dapat dilakukan dengan metode SAFSTOR (penyimpanan aman), DECON (pembongkaran langsung), atau ENTOMB (penyegelan permanen).
- Limbah tingkat tinggi membutuhkan penyimpanan jangka panjang di *repository* geologi seperti Onkalo di Finlandia.
- Teknologi transmutasi menjanjikan solusi masa depan untuk mengurangi radioaktivitas limbah nuklir.

Rekomendasi untuk Indonesia:

- Mempersiapkan kebijakan dekomisioning dini untuk PLTN yang akan dibangun, dengan mempertimbangkan metode SAFSTOR atau DECON.
- Membangun fasilitas penyimpanan sementara untuk bahan bakar bekas sebelum repository geologi siap.
- Meneliti teknologi transmutasi sebagai bagian dari strategi jangka panjang untuk pengelolaan limbah nuklir.

Kunci Keberlanjutan PLTN: Tidak hanya berfokus pada pembangkitan listrik, tetapi juga mengelola limbahnya secara bertanggung jawab untuk melindungi generasi mendatang.

14

TAHAPAN PEMBANGUNAN PLTN

Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) adalah proses yang kompleks yang memerlukan perencanaan matang, regulasi ketat, serta partisipasi aktif dari berbagai pemangku kepentingan. Di Indonesia, proyek PLTN harus disesuaikan dengan kebutuhan energi nasional, regulasi nuklir yang berlaku, serta dukungan teknologi dan keuangan dari berbagai pihak. Berikut adalah tahapan utama dalam pembangunan PLTN:

14.1. Tahap Perencanaan dan Studi Kelayakan

Kegiatan Utama:

- Identifikasi Kebutuhan Energi:
 - Menilai kebutuhan listrik nasional dan peran PLTN dalam bauran energi.
 - Menganalisis potensi PLTN untuk mengurangi ketergantungan pada energi fosil.
- Studi Kelayakan:
 - Melakukan analisis teknis, ekonomi, lingkungan, dan sosial.
 - Menyusun analisis biaya-manfaat (*cost-benefit analysis*) untuk proyek PLTN.
- Pemilihan Lokasi:
 - Menentukan lokasi yang memenuhi kriteria keamanan, geologi, dan lingkungan.
 - Contoh lokasi potensial di Indonesia: Bangka Belitung, Kalimantan, atau Jawa (daerah dengan risiko gempa rendah).

- Analisis Dampak Lingkungan (AMDAL):
 - Melakukan studi AMDAL untuk menilai dampak lingkungan dan sosial.
 - Melibatkan masyarakat dalam proses konsultasi publik.
- Penyusunan Rencana Induk:
 - Membuat rencana jangka panjang untuk pengembangan PLTN, termasuk pembiayaan dan kerangka regulasi.

14.2. Tahap Desain dan Perizinan

Kegiatan Utama:

- Pemilihan Teknologi Reaktor:
 - Menentukan jenis reaktor yang sesuai, seperti PWR, BWR, SMR, atau reaktor thorium.
- Desain Teknis:
 - Membuat desain detail PLTN, termasuk sistem keselamatan, pendinginan, dan pembuangan limbah.
 - Memastikan desain memenuhi standar IAEA dan regulasi nasional (BAPETEN).
- Pengajuan Perizinan:
 - Mengajukan izin konstruksi dan operasi kepada Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN).
 - Melengkapi dokumen studi keselamatan dan analisis risiko.
- Konsultasi Publik:
 - Melibatkan masyarakat dan pemangku kepentingan dalam proses perizinan.
 - Memberikan sosialisasi tentang manfaat dan risiko PLTN.

14.3. Tahap Konstruksi

Kegiatan Utama:

- Pembangunan Infrastruktur Pendukung:
 - Membangun jalan, jaringan listrik, dan fasilitas pendukung lainnya.
 - Menyiapkan sistem transportasi untuk bahan bakar nuklir dan limbah radioaktif.

- Konstruksi Reaktor dan Sistem Pendukung:
 - Membangun reaktor nuklir, sistem pendingin, turbin, generator, dan sistem keamanan.
 - Memastikan semua konstruksi memenuhi standar keamanan dan kualitas yang ketat.
- Pengawasan Kualitas:
 - Melakukan inspeksi dan pengawasan selama konstruksi untuk memastikan keselamatan dan keandalan.
- Pelatihan Personel:
 - Melatih staf operasional dan pemeliharaan untuk mengelola PLTN.
 - Mengirim tenaga ahli ke luar negeri untuk pelatihan dan magang.

14.4. Tahap Pengujian dan Komisioning

Kegiatan Utama:

- Pengujian Sistem:
 - Menguji semua sistem PLTN, termasuk sistem keselamatan, pendinginan, dan pembangkit listrik.
- Uji Coba Operasi:
 - Menjalankan PLTN pada kapasitas rendah untuk memastikan semua sistem berfungsi dengan baik.
- Inspeksi Regulator:
 - Badan regulasi melakukan inspeksi akhir sebelum PLTN diizinkan beroperasi penuh.

14.5. Tahap Operasi

- Operasi Harian:
 - Menjalankan PLTN sesuai prosedur standar untuk menghasilkan listrik.
- Pemeliharaan Rutin:
 - Melakukan pemeliharaan berkala untuk memastikan keamanan dan kinerja PLTN.

- Pengawasan Keamanan:
 - Memantau tingkat radiasi dan keamanan PLTN secara terus-menerus.
- Manajemen Limbah:
 - Mengelola limbah radioaktif sesuai standar keamanan ketat.

14.6. Tahap *Decommissioning* (Penutupan dan Pembongkaran)

Kegiatan Utama:

- Penghentian Operasi:
 - Menghentikan operasi PLTN setelah masa operasi selesai (biasanya 40-60 tahun).
- Pembongkaran Reaktor:
 - Membongkar reaktor dan fasilitas pendukung dengan aman.
- Pengelolaan Limbah:
 - Memindahkan dan menyimpan limbah radioaktif di fasilitas penyimpanan jangka panjang.
- Pemulihan Lokasi:
 - Membersihkan dan memulihkan lokasi PLTN untuk penggunaan lain.

14.7. Tahap Pasca-Operasi

Kegiatan Utama:

- Pemantauan Lingkungan:
 - Memantau lokasi bekas PLTN untuk memastikan tidak ada dampak lingkungan yang tersisa.
- Pengawasan Limbah:
 - Memastikan limbah radioaktif disimpan dengan aman selama periode yang diperlukan.
- Dokumentasi dan Pelaporan:
 - Mendokumentasikan seluruh proses decommissioning dan melaporkan kepada BAPETEN.

14.8. Faktor Penentu Keberhasilan Pembangunan PLTN

1. Dukungan Pemerintah:
 - Kebijakan dan regulasi yang jelas dari pemerintah pusat dan daerah.
2. Partisipasi Masyarakat:
 - Dukungan dan pemahaman masyarakat tentang PLTN melalui sosialisasi yang intensif.
3. Keahlian Teknis:
 - Ketersediaan tenaga ahli nuklir yang kompeten melalui pendidikan dan pelatihan.
4. Kerjasama Internasional:
 - Dukungan teknologi dan keuangan dari negara atau organisasi internasional seperti IAEA.
5. Manajemen Proyek yang Baik:
 - Koordinasi dan pengawasan yang efektif selama seluruh tahapan pembangunan.

Pembangunan PLTN di Indonesia adalah langkah strategis dalam transisi menuju energi bersih dan berkelanjutan. Dengan perencanaan yang matang dan dukungan dari berbagai pemangku kepentingan, PLTN dapat menjadi bagian penting dari solusi energi nasional.



15

ISU DAN TANTANGAN PLTN DI INDONESIA

Pembangunan dan pengoperasian PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir) di Indonesia menghadapi berbagai isu dan tantangan, baik teknis, sosial, ekonomi, maupun politik. Berikut adalah penjelasan lengkap mengenai isu-isu tersebut beserta alternatif solusinya:

15.1. Isu dan Tantangan Teknis

a. Kurangnya Pengalaman dan Keahlian

- Isu: Indonesia belum memiliki pengalaman dalam membangun dan mengoperasikan PLTN. Keahlian di bidang teknologi nuklir masih terbatas.
- Solusi:
 - Melakukan kerjasama internasional dengan negara yang sudah berpengalaman, seperti Rusia, Korea Selatan, atau Prancis.
 - Mengirim tenaga ahli Indonesia untuk pelatihan dan magang di PLTN luar negeri.
 - Mengembangkan dan Kolaborasi pusat penelitian dan pengembangan teknologi nuklir di Indonesia dengan PLN.

b. Ketersediaan Bahan Bakar Nuklir

- Isu: Indonesia tidak memiliki cadangan uranium yang signifikan, sehingga perlu mengimpor bahan bakar nuklir ataupun cadangan yang belum di exploitasi.

- Solusi:
 - Mengeksplorasi potensi Uranium dan thorium sebagai bahan bakar nuklir.
 - Membangun kerjasama jangka panjang dengan negara produsen uranium untuk pasokan bahan bakar.

c. Manajemen Limbah Radioaktif

- Isu: Limbah radioaktif dari PLTN memerlukan penanganan khusus dan penyimpanan jangka panjang yang aman.
- Solusi:
 - Mengadopsi teknologi daur ulang limbah nuklir untuk mengurangi volume limbah.
 - Membangun fasilitas penyimpanan limbah geologis dalam (*deep geological repository*) yang memenuhi standar keamanan internasional.

15.2. Isu dan Tantangan Sosial

a. Penolakan Masyarakat

- Isu: Masyarakat masih memiliki ketakutan dan kekhawatiran terhadap risiko kecelakaan nuklir dan limbah radioaktif.
- Solusi:
 - Melakukan sosialisasi intensif untuk memberikan pemahaman yang akurat tentang PLTN, termasuk manfaat dan sistem keamanannya.
 - Melibatkan masyarakat dalam proses pengambilan keputusan dan memberikan kompensasi atau manfaat ekonomi bagi daerah sekitar PLTN.

b. Isu Keamanan dan Proliferasi

- Isu: Ada kekhawatiran bahwa teknologi nuklir dapat disalahgunakan untuk tujuan militer.
- Solusi:
 - Mematuhi ketentuan non-proliferasi nuklir internasional dan bekerja sama dengan IAEA (*International Atomic Energy Agency*).
 - Membangun sistem pengawasan dan regulasi yang ketat untuk mencegah penyalahgunaan bahan bakar nuklir.

15.3. Isu dan Tantangan Ekonomi

a. Biaya Pembangunan yang Tinggi

- Isu: PLTN memerlukan investasi awal yang sangat besar, terutama untuk pembangunan pertama (*First-of-a-Kind/FOAK*).
- Solusi:
 - Mencari pendanaan melalui kerjasama internasional, investasi swasta, atau skema pembiayaan seperti KPB (Kerjasama Pemerintah dan Badan Usaha).
 - Mempertimbangkan reaktor modular kecil (SMR) yang memiliki biaya lebih rendah dan waktu konstruksi lebih singkat.

b. Ketergantungan pada Teknologi Impor

- Isu: Indonesia masih bergantung pada teknologi dan peralatan impor, yang dapat meningkatkan biaya dan risiko proyek.
- Solusi:
 - Mengembangkan industri lokal untuk mendukung pembangunan PLTN, seperti industri komponen dan jasa teknik.
 - Melakukan *transfer teknologi* melalui kerjasama dengan negara produsen PLTN.

15.4. Isu dan Tantangan Lingkungan

a. Risiko Kecelakaan Nuklir

- Isu: Meskipun jarang, kecelakaan nuklir seperti Chernobyl atau Fukushima dapat memiliki dampak lingkungan dan kesehatan yang serius.
- Solusi:
 - Mengadopsi reaktor generasi III+ atau IV yang memiliki sistem keamanan pasif dan risiko kecelakaan yang lebih rendah.
 - Membangun sistem tanggap darurat dan pelatihan rutin untuk menghadapi skenario terburuk.

b. Dampak Lingkungan selama Konstruksi

- Isu: Pembangunan PLTN dapat mengganggu ekosistem sekitar, terutama jika lokasinya dekat dengan kawasan konservasi atau permukiman.

- Solusi:
 - Memilih lokasi yang jauh dari kawasan sensitif secara ekologis dan sosial.
 - Melakukan analisis dampak lingkungan (AMDAL) secara komprehensif dan melibatkan masyarakat dalam prosesnya.

c. Pendidikan dan Sosialisasi

- Meningkatkan pemahaman masyarakat tentang PLTN melalui pendidikan formal dan kampanye publik.
- Membuka pusat informasi nuklir untuk memberikan akses transparan kepada masyarakat.

Pilot Project: Membangun proyek percontohan PLTN skala kecil (seperti SMR) untuk membangun kepercayaan dan pengalaman lokal.

Kerjasama Internasional: Memanfaatkan dukungan teknis dan finansial dari organisasi internasional seperti IAEA atau negara-negara maju dalam teknologi nuklir.

Inovasi Teknologi: Mengembangkan teknologi nuklir yang lebih aman dan efisien, seperti reaktor thorium atau reaktor garam cair (MSR).

PLTN di Indonesia memiliki potensi besar untuk diversifikasi energi dan mengurangi emisi karbon, tetapi menghadapi berbagai tantangan teknis, sosial, ekonomi, dan politik. Dengan solusi yang tepat, seperti kerjasama internasional, sosialisasi intensif, dan penguatan regulasi, tantangan ini dapat diatasi. PLTN dapat menjadi bagian penting dari bauran energi Indonesia yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

16

MANAJEMEN MUTU DAN STANDART PENGELOLAAN PLTN

Manajemen aset adalah pendekatan sistematis untuk mengelola aset fisik, seperti infrastruktur, peralatan, dan fasilitas, guna memaksimal-kan nilai, kinerja, dan umur pakainya. Dalam konteks PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir), manajemen aset menjadi sangat kritis karena PLTN merupakan aset strategis dengan risiko tinggi, biaya besar, dan dampak yang signifikan terhadap keselamatan, lingkungan, dan ekonomi.

ISO 55001 adalah standar internasional untuk sistem manajemen aset (Asset Management System/AMS) yang memberikan kerangka kerja untuk mengelola aset secara efektif dan efisien.

16.1. Prinsip Dasar ISO 55001

ISO 55001 dirancang untuk membantu organisasi mengelola asetnya secara holistik, dengan fokus pada:

- Penyejajaran Strategis: Memastikan bahwa pengelolaan aset selaras dengan tujuan organisasi dan kebutuhan pemangku kepentingan.
- Nilai Aset: Memaksimalkan nilai yang dihasilkan oleh aset selama siklus hidupnya.
- Kepemimpinan dan Budaya: Menciptakan budaya organisasi yang mendukung manajemen aset yang efektif.
- Risiko dan Peluang: Mengidentifikasi dan mengelola risiko serta peluang yang terkait dengan aset.

- Kinerja dan Perbaikan Berkelanjutan: Memantau, mengevaluasi, dan meningkatkan kinerja aset secara terus-menerus.

16.2. Penerapan ISO 55001 dalam Pengelolaan PLTN

PLTN adalah aset yang kompleks dan berisiko tinggi, sehingga penerapan ISO 55001 harus disesuaikan dengan karakteristik khususnya. Berikut adalah langkah-langkah penerapannya:

a. Penetapan Konteks Organisasi

- Identifikasi Pemangku Kepentingan: Menentukan pihak-pihak yang berkepentingan dengan PLTN, seperti pemerintah, regulator, masyarakat, dan investor.
- Analisis Lingkungan Eksternal dan Internal: Memahami faktor-faktor yang memengaruhi pengelolaan PLTN, seperti regulasi, teknologi, dan kondisi geografis.

b. Perencanaan Manajemen Aset

- Kebijakan Manajemen Aset: Menetapkan kebijakan yang jelas tentang tujuan dan prinsip pengelolaan PLTN.
- Tujuan dan Sasaran: Menetapkan tujuan spesifik, seperti memaksimalkan keandalan, meminimalkan biaya, dan memastikan keselamatan.
- Rencana Manajemen Aset: Membuat rencana detail untuk mengelola PLTN selama siklus hidupnya, termasuk pembangunan, operasi, pemeliharaan, dan decommissioning.

c. Implementasi dan Operasi

- Struktur Organisasi dan Tanggung Jawab: Menetapkan tim dan tanggung jawab yang jelas untuk manajemen aset PLTN.
- Kompetensi dan Pelatihan: Memastikan bahwa staf memiliki kompetensi yang diperlukan untuk mengelola PLTN, termasuk pelatihan keselamatan nuklir.
- Manajemen Risiko: Mengidentifikasi, menilai, dan mengelola risiko yang terkait dengan PLTN, seperti kecelakaan nuklir, kegagalan peralatan, dan gangguan pasokan bahan bakar.
- Manajemen Perubahan: Mengelola perubahan dalam operasi, teknologi, atau regulasi yang memengaruhi PLTN.

d. **Evaluasi Kinerja**

- Pemantauan dan Pengukuran: Memantau kinerja PLTN, seperti keandalan, efisiensi, dan tingkat radiasi.
- Audit Internal: Melakukan audit rutin untuk memastikan kepatuhan terhadap standar dan regulasi.
- Tinjauan Manajemen: Mengevaluasi efektivitas sistem manajemen aset dan membuat perbaikan jika diperlukan.

e. **Perbaikan Berkelanjutan**

- Tindakan Perbaikan dan Pencegahan: Mengidentifikasi dan mengatasi masalah yang muncul, serta mencegah masalah di masa depan.
- Inovasi dan Pembelajaran: Menerapkan teknologi dan praktik terbaru untuk meningkatkan kinerja PLTN.

16.3. Standar Terkait dalam Pengelolaan PLTN

Selain ISO 55001, beberapa standar internasional dan nasional terkait yang relevan untuk pengelolaan PLTN adalah:

a. **ISO 19443:2018 (*Quality Management Systems for Nuclear Energy*)**

- Standar ini menyediakan persyaratan khusus untuk sistem manajemen mutu di industri nuklir, termasuk PLTN.
- Fokus pada keselamatan, keandalan, dan kepatuhan terhadap regulasi nuklir.

b. **IAEA Safety Standards (*International Atomic Energy Agency*)**

- Standar keselamatan IAEA, seperti IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/1, memberikan panduan untuk desain, konstruksi, dan operasi PLTN yang aman.
- Standar ini mencakup aspek seperti keselamatan reaktor, manajemen limbah radioaktif, dan kesiapan tanggap darurat.

c. **ISO 9001 (*Quality Management Systems*)**

- Standar ini dapat digunakan untuk memastikan bahwa proses manajemen aset PLTN memenuhi standar mutu internasional.

d. **ISO 14001 (*Environmental Management Systems*)**

- Standar ini membantu mengelola dampak lingkungan dari PLTN, seperti pengelolaan limbah radioaktif dan emisi.

- e. ISO 45001 (*Occupational Health and Safety Management Systems*)
 - Standar ini memastikan keselamatan dan kesehatan kerja bagi staf yang terlibat dalam pengelolaan PLTN.

16.4. Tantangan dalam Penerapan ISO 55001 untuk PLTN

- Kompleksitas Teknis: PLTN memiliki teknologi yang sangat kompleks, sehingga memerlukan pendekatan manajemen aset yang canggih.
- Regulasi Ketat: PLTN harus mematuhi regulasi keselamatan nuklir yang sangat ketat, baik nasional maupun internasional.
- Keterlibatan Pemangku Kepentingan: PLTN melibatkan banyak pemangku kepentingan dengan kepentingan yang berbeda, sehingga koordinasi dan komunikasi menjadi tantangan.

16.5. Manfaat Penerapan ISO 55001 untuk PLTN

- Meningkatkan Keandalan: Memastikan PLTN beroperasi dengan kinerja optimal dan mengurangi risiko kegagalan.
- Memaksimalkan Nilai Aset: Memperpanjang umur pakai PLTN dan mengurangi biaya siklus hidup.
- Meningkatkan Keselamatan: Memastikan keselamatan operasi dan mengurangi risiko kecelakaan nuklir.
- Kepatuhan Regulasi: Memastikan PLTN mematuhi semua regulasi keselamatan dan lingkungan.
- Keberlanjutan: Mendukung transisi energi rendah karbon dengan memastikan PLTN beroperasi secara efisien dan ramah lingkungan.

Penerapan ISO 55001 dan standar terkait dalam pengelolaan PLTN memberikan kerangka kerja yang sistematis dan terstruktur untuk memastikan keselamatan, keandalan, dan keberlanjutan PLTN. Dengan mengintegrasikan prinsip-prinsip manajemen aset, PLTN dapat dikelola secara efektif, meminimalkan risiko, dan memaksimalkan nilai bagi pemangku kepentingan. Hal ini sangat penting mengingat PLTN merupakan aset strategis dengan dampak yang signifikan terhadap lingkungan, ekonomi, dan masyarakat.

LAMPIRAN I

PERTANYAAN DAN

JAWABAN MENGENAI

PLTN

1. Apa itu PLTN?

PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir) adalah fasilitas yang menghasilkan listrik dengan memanfaatkan reaksi nuklir, khususnya reaksi fisi nuklir. Reaksi ini membelah atom-atom berat seperti uranium atau plutonium, melepaskan energi panas yang kemudian digunakan untuk memanaskan air, menghasilkan uap, dan menggerakkan turbin untuk menghasilkan listrik.

2. Bagaimana cara kerja PLTN?

Cara kerja PLTN dapat dijelaskan dalam beberapa langkah:

1. Reaksi Fisi: Atom uranium-235 atau plutonium-239 dibelah dalam reaktor nuklir, menghasilkan energi panas.
2. Pemanasan Air: Panas dari reaksi fisi digunakan untuk memanaskan air dalam sistem tertutup.
3. Pembentukan Uap: Air yang dipanaskan berubah menjadi uap bertekanan tinggi.
4. Penggerakan Turbin: Uap menggerakkan turbin yang terhubung ke generator.
5. Pembuatan Listrik: Generator menghasilkan listrik yang kemudian didistribusikan ke jaringan listrik.
6. Pendinginan: Uap didinginkan kembali menjadi air dan siklus berulang.

3. Apa keuntungan PLTN?

Beberapa keuntungan PLTN adalah:

- Energi Bersih: PLTN tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca seperti CO₂ selama operasi normal.
- Efisiensi Tinggi: Satu gram uranium dapat menghasilkan energi yang setara dengan beberapa ton batubara.
- Pasokan Stabil: PLTN dapat beroperasi 24/7, tidak tergantung pada cuaca seperti energi surya atau angin.
- Pengurangan Ketergantungan pada Bahan Bakar Fosil: PLTN dapat mengurangi penggunaan batubara, minyak, dan gas alam.

4. Apa risiko atau kekurangan PLTN?

Risiko dan kekurangan PLTN meliputi:

- Limbah Radioaktif: PLTN menghasilkan limbah radioaktif yang berbahaya dan membutuhkan penyimpanan jangka panjang.
- Kecelakaan Nuklir: Meskipun jarang, kecelakaan seperti Chernobyl (1986) atau Fukushima (2011) dapat memiliki dampak lingkungan dan kesehatan yang serius.
- Biaya Tinggi: Pembangunan dan pemeliharaan PLTN membutuhkan investasi besar.
- Proliferasi Nuklir: Bahan bakar nuklir dapat disalahgunakan untuk pembuatan senjata nuklir.

5. Apakah PLTN aman?

PLTN modern dirancang dengan sistem keamanan berlapis untuk mencegah kecelakaan. Beberapa fitur keamanan meliputi:

- Sistem Pendingin Darurat: Untuk mencegah overheating reaktor.
- *Containment Building*: Struktur beton tebal yang menahan radiasi jika terjadi kebocoran.
- Protokol Ketat: Standar operasi dan pemeliharaan yang sangat ketat.

Meskipun demikian, tidak ada sistem yang 100% bebas risiko, sehingga pengawasan dan regulasi yang ketat sangat penting.

6. Bagaimana dengan limbah nuklir?

Limbah nuklir dikategorikan menjadi dua:

- Limbah Radioaktif Tingkat Rendah: Seperti pakaian atau peralatan yang terkontaminasi, dapat disimpan dalam fasilitas khusus.
- Limbah Radioaktif Tingkat Tinggi: Seperti bahan bakar bekas, membutuhkan penyimpanan jangka panjang di fasilitas geologis dalam yang aman.
- Teknologi seperti daur ulang bahan bakar nuklir juga sedang dikembangkan untuk mengurangi volume limbah.

7. Apakah PLTN ramah lingkungan?

PLTN dianggap ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca selama operasi normal. Namun, proses penambangan uranium dan pembangunan PLTN memiliki dampak lingkungan tertentu. Selain itu, limbah radioaktif memerlukan penanganan khusus untuk mencegah pencemaran lingkungan.

8. Mengapa PLTN belum banyak digunakan di Indonesia?

Beberapa alasan PLTN belum banyak digunakan di Indonesia adalah:

- Ketersediaan Sumber Energi Lain: Indonesia memiliki sumber energi fosil dan terbarukan yang melimpah seperti batubara, gas, panas bumi, dan tenaga air.
- Kekhawatiran Masyarakat: Masih ada ketakutan akan risiko kecelakaan nuklir dan limbah radioaktif.
- Biaya dan Teknologi: Pembangunan PLTN memerlukan investasi besar dan teknologi canggih yang belum sepenuhnya dikuasai.
- Regulasi dan Kebijakan: Perlu kerangka regulasi yang kuat dan dukungan politik untuk mengembangkan PLTN.

9. Apa perbedaan PLTN dengan pembangkit listrik lainnya?

Perbedaan utama PLTN dengan pembangkit listrik lainnya adalah sumber energinya:

- PLTN: Menggunakan reaksi fisi nuklir.
- Pembangkit Batubara/Gas: Membakar bahan bakar fosil untuk menghasilkan panas.

- Pembangkit Tenaga Air: Menggunakan energi kinetik air.
- Pembangkit Surya/Angin: Menggunakan energi terbarukan dari matahari atau angin.

PLTN memiliki efisiensi energi yang tinggi dan tidak menghasilkan emisi langsung, tetapi memerlukan penanganan limbah radioaktif.

10. Apa yang harus dilakukan jika terjadi kecelakaan PLTN?

Jika terjadi kecelakaan PLTN, langkah-langkah yang harus diambil adalah:

- Mengikuti Instruksi Pemerintah: Mendengarkan informasi resmi dari otoritas setempat.
- Evakuasi: Jika diperlukan, evakuasi harus dilakukan dengan tertib dan cepat.
- Melindungi Diri: Menggunakan masker, menutup jendela, dan menghindari paparan udara luar.
- Minum Air dan Makanan yang Aman: Pastikan air dan makanan tidak terkontaminasi.
- Menjaga Jarak: Menjauh dari zona bahaya sesuai petunjuk.

11. Apakah PLTN bisa menjadi solusi energi masa depan?

PLTN bisa menjadi salah satu solusi energi masa depan, terutama untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan ketergantungan pada bahan bakar fosil. Namun, pengembangannya harus disertai dengan:

- Teknologi yang lebih aman.
- Manajemen limbah yang efektif.
- Dukungan dan pemahaman masyarakat.
- Regulasi yang ketat dan transparan.

12. Apa itu reaktor nuklir generasi IV?

Reaktor nuklir generasi IV adalah desain reaktor nuklir canggih yang sedang dikembangkan untuk meningkatkan keamanan, efisiensi, dan keberlanjutan. Beberapa fiturnya meliputi:

- Suhu Operasi Tinggi: Dapat digunakan untuk menghasilkan listrik dan proses industri seperti produksi hidrogen.

- Bahan Bakar Efisien: Menggunakan bahan bakar lebih efisien dan menghasilkan limbah lebih sedikit.
- Keamanan Pasif: Sistem keamanan yang bekerja tanpa memerlukan sumber energi eksternal.
- Pengurangan Risiko Proliferasi: Desain yang mengurangi risiko penyalahgunaan bahan bakar nuklir untuk senjata.

13. Apa peran PLTN dalam transisi energi?

PLTN dapat memainkan peran penting dalam transisi energi menuju sistem energi rendah karbon karena:

- Stabilitas Jaringan Listrik: PLTN dapat menyediakan pasokan listrik yang stabil dan andal, melengkapi energi terbarukan yang bersifat intermiten (seperti surya dan angin).
- Pengurangan Emisi: PLTN tidak menghasilkan emisi CO₂ selama operasi, sehingga membantu mengurangi dampak perubahan iklim.
- Diversifikasi Energi: PLTN dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan meningkatkan keamanan energi.

14. Apa itu energi nuklir thorium?

Energi nuklir thorium adalah alternatif dari uranium yang menggunakan thorium sebagai bahan bakar. Keunggulannya meliputi:

- Kelimpahan Thorium: Thorium lebih melimpah di alam dibandingkan uranium.
- Limbah Lebih Sedikit: Thorium menghasilkan limbah radioaktif yang lebih sedikit dan berumur lebih pendek.
- Risiko Proliferasi Rendah: Thorium tidak dapat langsung digunakan untuk senjata nuklir.

Namun, teknologi ini masih dalam tahap pengembangan dan belum digunakan secara komersial.

15. Bagaimana PLTN memengaruhi ekonomi?

PLTN dapat memberikan dampak ekonomi yang signifikan, baik positif maupun negatif:

- Penciptaan Lapangan Kerja: Pembangunan dan operasi PLTN menciptakan ribuan lapangan kerja langsung dan tidak langsung.

- Investasi Besar: PLTN memerlukan modal awal yang besar, tetapi biaya operasional jangka panjang relatif rendah.
- Stabilitas Harga Listrik: PLTN dapat menyediakan listrik dengan harga yang stabil karena tidak tergantung pada fluktuasi harga bahan bakar fosil.
- Dampak Lokal: PLTN dapat meningkatkan infrastruktur dan perekonomian di daerah sekitar.

16. Apa itu PLTN modular kecil (SMR)?

PLTN modular kecil (*Small Modular Reactor/SMR*) adalah reaktor nuklir berkapasitas lebih kecil (biasanya di bawah 300 MW) yang dirancang untuk lebih fleksibel dan ekonomis. Keunggulannya meliputi:

- Biaya Lebih Rendah: Dibangun secara modular, sehingga mengurangi biaya konstruksi.
- Fleksibilitas Lokasi: Dapat dipasang di daerah terpencil atau daerah dengan jaringan listrik terbatas.
- Keamanan Tinggi: Desainnya lebih sederhana dan memiliki fitur keamanan pasif.
- Skalabilitas: Beberapa unit SMR dapat digabungkan untuk memenuhi kebutuhan energi yang lebih besar.

17. Apa peran IAEA dalam pengembangan PLTN?

IAEA (*International Atomic Energy Agency*) adalah badan internasional yang bertugas mempromosikan penggunaan energi nuklir secara damai dan aman. Peran IAEA meliputi:

- Pengawasan Keamanan: Memastikan PLTN di seluruh dunia mematuhi standar keamanan internasional.
- Bantuan Teknis: Memberikan dukungan teknis dan pelatihan untuk negara-negara yang mengembangkan PLTN.
- Pengawasan Non-Proliferasi: Memastikan bahan bakar nuklir tidak disalahgunakan untuk senjata.
- Riset dan Pengembangan: Mendorong inovasi dalam teknologi nuklir.

18. Apa dampak PLTN terhadap kesehatan manusia?

Dampak PLTN terhadap kesehatan manusia tergantung pada operasi dan manajemen limbahnya:

- Operasi Normal: PLTN modern dirancang untuk meminimalkan paparan radiasi terhadap pekerja dan masyarakat. Tingkat radiasi di sekitar PLTN biasanya lebih rendah daripada paparan alami dari lingkungan.
- Kecelakaan: Kecelakaan nuklir dapat menyebabkan paparan radiasi yang berbahaya, meningkatkan risiko kanker dan penyakit lainnya.
- Limbah Radioaktif: Jika tidak dikelola dengan baik, limbah radioaktif dapat mencemari lingkungan dan membahayakan kesehatan manusia.

19. Apa itu PLTN terapung?

PLTN terapung adalah konsep pembangkit listrik tenaga nuklir yang dibangun di atas kapal atau platform terapung. Keunggulannya meliputi:

- Fleksibilitas Lokasi: Dapat dipindahkan ke daerah yang membutuhkan pasokan listrik.
- Pengurangan Risiko Gempa: Dapat ditempatkan di lokasi yang lebih aman dari gempa bumi.
- Efisiensi Biaya: Konstruksi di pabrik dapat mengurangi biaya dan waktu pembangunan.

Rusia telah mengoperasikan PLTN terapung pertama di dunia, yaitu Akademik Lomonosov.

20. Bagaimana masyarakat dapat terlibat dalam pengambilan keputusan tentang PLTN?

Masyarakat dapat terlibat dalam pengambilan keputusan tentang PLTN melalui:

- Konsultasi Publik: Mengikuti dialog dan konsultasi yang diselenggarakan oleh pemerintah atau perusahaan.
- Pendidikan dan Sosialisasi: Mempelajari informasi yang akurat tentang PLTN untuk membuat keputusan yang terinformasi.
- Partisipasi dalam Lembaga Pengawas: Bergabung dengan lembaga pengawas atau organisasi masyarakat sipil yang memantau pengembangan PLTN.
- Memberikan Masukan: Menyampaikan pendapat dan kekhawatiran kepada pemangku kepentingan melalui saluran yang tersedia.

21. Apa tantangan utama dalam pengembangan PLTN?

Tantangan utama dalam pengembangan PLTN meliputi:

- Persepsi Masyarakat: Ketakutan dan kekhawatiran masyarakat tentang risiko nuklir.
- Biaya Awal Tinggi: Investasi awal yang besar untuk pembangunan PLTN.
- Manajemen Limbah: Penanganan dan penyimpanan limbah radioaktif yang aman.
- Regulasi Kompleks: Perlu kerangka regulasi yang ketat dan transparan.
- Ketergantungan pada Teknologi Impor: Banyak negara masih bergantung pada teknologi dan ahli dari luar negeri.

22. Apa perbedaan PLTN dengan senjata nuklir?

Perbedaan utama antara PLTN dan senjata nuklir adalah tujuannya:

- PLTN: Dirancang untuk menghasilkan listrik secara terkendali dan aman melalui reaksi fisi nuklir.
- Senjata Nuklir: Dirancang untuk menghasilkan ledakan besar dengan melepaskan energi nuklir secara tidak terkendali.

Bahan bakar yang digunakan dalam PLTN (uranium rendah-enriched) tidak dapat digunakan langsung untuk senjata nuklir, yang memerlukan uranium atau plutonium tingkat tinggi.

23. Apa saja jenis-jenis PLTN?

PLTN dapat dibedakan berdasarkan jenis reaktor yang digunakan. Beberapa jenis reaktor nuklir yang umum adalah:

1. Reaktor Air Ringan (*Light Water Reactor/LWR*):
 - a. Reaktor Air Tekan (*Pressurized Water Reactor/PWR*): Menggunakan air bertekanan tinggi sebagai pendingin dan moderator. Contoh: PLTN di Prancis dan AS.
 - b. Reaktor Air Didih (*Boiling Water Reactor/BWR*): Air didihkan langsung dalam reaktor untuk menghasilkan uap. Contoh: PLTN di Jepang.
2. Reaktor Air Berat (*Heavy Water Reactor/HWR*): Menggunakan air berat (deuterium oksida) sebagai moderator. Contoh: Reaktor CANDU di Kanada.
3. Reaktor Gas (*Gas-Cooled Reactor/GCR*): Menggunakan gas (biasanya helium

atau CO₂) sebagai pendingin. Contoh: Reaktor di Inggris.

4. Reaktor Cepat (*Fast Breeder Reactor/FBR*): Menggunakan neutron cepat dan dapat menghasilkan lebih banyak bahan bakar daripada yang dikonsumsi. Contoh: Reaktor di Rusia dan India.
5. Reaktor Garam Cair (*Molten Salt Reactor/MSR*): Menggunakan bahan bakar cair dalam bentuk garam cair. Masih dalam tahap pengembangan.

24. Negara mana saja yang mengoperasikan PLTN?

Hingga 2023, lebih dari 30 negara mengoperasikan PLTN. Beberapa negara dengan jumlah PLTN terbanyak adalah:

1. Amerika Serikat (AS): 93 reaktor operasional (terbanyak di dunia).
2. Prancis: 56 reaktor, menyumbang sekitar 70% kebutuhan listrik nasional.
3. China: Lebih dari 55 reaktor, dengan banyak lagi sedang dibangun.
4. Rusia: 37 reaktor.
5. Jepang: 33 reaktor (sebagian masih non-aktif pasca-Fukushima).
6. Korea Selatan: 25 reaktor.
7. India: 23 reaktor.
8. Kanada: 19 reaktor (menggunakan teknologi CANDU).
9. Inggris: 15 reaktor.
10. Ukraina: 15 reaktor.

25. Berapa persentase listrik dunia yang dihasilkan oleh PLTN?

Hingga 2023, PLTN menyumbang sekitar 10% dari total produksi listrik dunia. Beberapa negara memiliki ketergantungan tinggi pada PLTN, seperti:

1. Prancis: 70% listrik dari PLTN.
2. Slovakia: 55% listrik dari PLTN.
3. Ukraina: 55% listrik dari PLTN.
4. Hungaria: 50% listrik dari PLTN.
5. Korea Selatan: 30% listrik dari PLTN.
6. Amerika Serikat: 20% listrik dari PLTN.
7. China: 5% listrik dari PLTN (namun terus meningkat).

26. Negara mana saja yang memproduksi PLTN?

Beberapa negara yang memproduksi teknologi dan komponen PLTN adalah:

1. Amerika Serikat: Perusahaan seperti Westinghouse dan *General Electric*.
2. Prancis: Perusahaan Areva (sekarang *Orano* dan *Framatome*).
3. Rusia: Perusahaan Rosatom.
4. Korea Selatan: Perusahaan *Korea Hydro & Nuclear Power* (KHNP).
5. Jepang: Perusahaan seperti Mitsubishi Heavy Industries dan Toshiba.
6. China: Perusahaan *China National Nuclear Corporation* (CNNC) dan *China General Nuclear Power Group* (CGN).
7. Kanada: Perusahaan seperti *Canadian Nuclear Laboratories* (CNL) untuk teknologi CANDU.
8. Jerman: Meskipun sedang melakukan *phase-out*, perusahaan seperti Siemens pernah aktif dalam produksi PLTN.

27. Apa itu PLTN generasi III dan III+?

PLTN generasi III dan III+ adalah reaktor nuklir modern dengan fitur keamanan dan efisiensi yang lebih baik dibandingkan generasi sebelumnya. Beberapa contohnya adalah:

- AP1000 (AS): Reaktor air tekan dengan sistem keamanan pasif.
- EPR (Prancis): Reaktor air tekan dengan desain canggih dan efisiensi tinggi.
- VVER-1200 (Rusia): Reaktor air tekan dengan fitur keamanan modern.
- APR-1400 (Korea Selatan): Reaktor air tekan dengan kapasitas besar dan keamanan tinggi.

28. Apa itu PLTN modular kecil (SMR)?

PLTN modular kecil (*Small Modular Reactor/SMR*) adalah reaktor nuklir berkapasitas kecil (biasanya di bawah 300 MW) yang dirancang untuk lebih fleksibel dan ekonomis. Keunggulannya meliputi:

- Biaya Lebih Rendah: Dibangun secara modular, sehingga mengurangi biaya konstruksi.
- Fleksibilitas Lokasi: Dapat dipasang di daerah terpencil atau daerah dengan jaringan listrik terbatas.

- Keamanan Tinggi: Desainnya lebih sederhana dan memiliki fitur keamanan pasif.
- Skalabilitas: Beberapa unit SMR dapat digabungkan untuk memenuhi kebutuhan energi yang lebih besar.

Negara seperti Rusia, China, dan AS sedang mengembangkan SMR.

29. Apa peran PLTN dalam mengurangi emisi karbon?

PLTN memiliki peran penting dalam mengurangi emisi karbon karena:

- Tidak Menghasilkan Emisi CO₂: Selama operasi normal, PLTN tidak melepaskan gas rumah kaca.
- Pengganti Batubara dan Gas: PLTN dapat menggantikan pembangkit listrik berbahan bakar fosil, mengurangi emisi secara signifikan.
- Dukungan untuk Energi Terbarukan: PLTN dapat menyediakan pasokan listrik yang stabil, melengkapi energi terbarukan yang bersifat intermiten (seperti surya dan angin).

30. Apa tantangan utama dalam pengembangan PLTN?

Tantangan utama dalam pengembangan PLTN meliputi:

- Biaya Awal Tinggi: Investasi awal yang besar untuk pembangunan PLTN.
- Manajemen Limbah: Penanganan dan penyimpanan limbah radioaktif yang aman.
- Persepsi Masyarakat: Ketakutan dan kekhawatiran masyarakat tentang risiko nuklir.
- Regulasi Kompleks: Perlu kerangka regulasi yang ketat dan transparan.
- Ketergantungan pada Teknologi Impor: Banyak negara masih bergantung pada teknologi dan ahli dari luar negeri.



LAMPIRAN II

REFERENSI DAN

BAHAN PENDALAMAN

LANJUTAN

1. Prinsip Dasar Energi Nuklir dan Teknologi PLTN

- International Atomic Energy Agency (IAEA):
 - “Nuclear Power Reactors in the World” (2023).
 - “Fundamentals of Nuclear Physics and Reactor Theory” (IAEA Training Series).
 - Situs web: www.iaea.org.
- *World Nuclear Association* (WNA):
 - “How a Nuclear Reactor Works” (2023).
 - Situs web: www.world-nuclear.org.
- https://id.wikipedia.org/wiki/Pembangkit_listrik_tenaga_nuklir

2. Keselamatan dan Pengendalian PLTN

1. Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN):
 - “Peraturan Keselamatan Reaktor Nuklir” (PP No. 43/2006).
 - Situs web: www.bapeten.go.id.
2. Studi Kasus Fukushima Daiichi:
 - “The Fukushima Daiichi Accident” (IAEA Report, 2015).
 - “Lessons Learned from Fukushima” (OECD/NEA, 2016).

3. Dampak Lingkungan dan Sosial

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC):
 - "Special Report on Global Warming of 1.5°C" (2018).
 - Data emisi CO₂ dari berbagai sumber energi.
2. World Health Organization (WHO):
 - "Health Impacts of Nuclear Power Plants" (2020).
3. BATAN dan Kementerian ESDM:
 - "Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) 2017".
 - Data potensi uranium dan thorium di Indonesia.

4. Masa Depan Energi Nuklir (Reaktor Generasi IV dan Fusii Nuklir)

1. Generation IV International Forum (GIF):
 - "Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems" (2021).
 - Situs web: www.gen-4.org.
2. ITER Organization:
 - "Progress in Fusion Energy Research" (2023).
 - Situs web: www.iter.org.

5. PLTN di Indonesia

1. BATAN:
 - "Studi Kelayakan PLTN di Indonesia" (2020).
 - "Potensi Lokasi PLTN di Bangka Belitung dan Kalimantan Barat" (2021).
2. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM):
 - "Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) 2017".
 - Data kebutuhan energi nasional dan bauran energi.
3. IAEA Country Profile: Indonesia:
 - "Nuclear Power Infrastructure Development in Indonesia" (2022).

6. Kompetensi SDM dan Struktur Organisasi PLTN

1. BAPETEN: "Pedoman Sertifikasi Operator Reaktor Nuklir" (2020).
2. International Atomic Energy Agency (IAEA). (2020). "Competency Frameworks for Nuclear Power Plant Personnel" (IAEA-TECDOC-2004).
3. Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN). (2023). "Laporan Operasional Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy."
4. Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN). (2021). "Regulasi dan Standar Keselamatan Nuklir di Indonesia."
5. PT PLN (Persero). (2023). "Laporan Tahunan: Pengalaman dan Kapabilitas dalam Pembangkitan Listrik."

7. Sosialisasi PLTN ke Masyarakat

1. IAEA Public Communication:
 - "Communicating Nuclear Energy to the Public" (IAEA, 2020).
 - Situs web: www.iaea.org/topics/communication.
2. World Nuclear Association (WNA):
 - "Myths and Facts about Nuclear Energy" (2023).
 - Situs web: www.world-nuclear.org.
3. BATAN dan BAPETEN: Materi sosialisasi PLTN untuk masyarakat umum (2021).

8. Manajemen Aset dan Standar ISO

1. International Organization for Standardization (ISO):
 - "ISO 55001:2014 - Asset Management Systems" (2014).
 - "ISO 19443:2018 - Quality Management Systems for Nuclear Energy" (2018).
2. Institute of Asset Management (IAM):
 - "Asset Management: An Anatomy" (2023).
 - "ISO 55001 and Its Application in the Energy Sector" (2023).
3. IAEA:
 - "Asset Management for Nuclear Power Plants" (IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-3.22, 2018).
 - "Integrated Life Cycle Management for Nuclear Power Plants" (2023).

9. Biaya Pembangunan dan Operasi PLTN

1. International Energy Agency (IEA):
 - "Projected Costs of Generating Electricity" (2020).
 - "Nuclear Power in a Clean Energy System" (2019).
2. OECD Nuclear Energy Agency (NEA):
 - "The Costs of Decarbonisation: System Costs with High Shares of Nuclear and Renewables" (2019).
3. U.S. Energy Information Administration (EIA):
 - "Levelized Costs of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2023" (2023).
4. World Nuclear Association (WNA):
 - "Economics of Nuclear Power" (2023).

10. Sumber Data Tambahan

1. International Energy Agency (IEA):
 - Data emisi CO2 dari berbagai sumber energi (2023).
 - Situs web: www.iea.org.
2. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR):
 - Data dampak radiasi dan keselamatan nuklir (2022).
 - Situs web: www.unscear.org.
3. OECD Nuclear Energy Agency (NEA):
 - Data biaya dan kinerja PLTN (2023).
 - Situs web: www.oecd-nea.org.

11. Maintenance & Reliability Management

- International Atomic Energy Agency (IAEA) – Nuclear Power Plant Maintenance (TECDOC-1550)
- Institute of Nuclear Power Operations (INPO) – Equipment Reliability Process Description
- World Association of Nuclear Operators (WANO) – Performance Indicators for Nuclear Power Plants

- U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) – Maintenance Rule Implementation Guide (NUMARC 93-01)
- EPRI (Electric Power Research Institute) – Predictive Maintenance Best Practices for Nuclear Plants
- IAEA TECDOC-2068, Effective Work Management for Sustaining Operational Excellence at Nuclear Power Plants.
- INPO AP-913, Equipment Reliability Process Description.

12. Referensi untuk Pendalaman Operasi PLTN

1. IAEA Safety Standards SSR-2/2 (Rev.1)

International Atomic Energy Agency (IAEA). (2016). Safety of Nuclear Power Plants: Design. IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/2 (Rev. 1). Vienna: IAEA.

– Relevansi: Standar keselamatan untuk desain dan operasi PLTN.

2. IAEA Safety Standards GS-R-3

International Atomic Energy Agency (IAEA). (2016). The Management System for Facilities and Activities. IAEA Safety Standards Series No. GS-R-3. Vienna: IAEA.

– Relevansi: Pedoman sistem manajemen untuk operasi fasilitas nuklir.

3. IAEA TECDOC-1550

International Atomic Energy Agency (IAEA). (2007). Considerations on the Application of the IAEA Safety Requirements for the Design of Nuclear Power Plants. IAEA-TECDOC-1550. Vienna: IAEA.

– Relevansi: Panduan aplikasi persyaratan keselamatan dalam operasi PLTN.

4. INPO AP-913

Institute of Nuclear Power Operations (INPO). (2019). Equipment Reliability Process Description. INPO AP-913, Rev. 4. Atlanta: INPO.

– Relevansi: Proses keandalan peralatan untuk operasi PLTN yang aman dan efisien.

13. Referensi Penbuatan & Editing Buku

1. DeepSeek

DeepSeek. (2023). AI-Powered Writing and Editing Assistance. Diakses dari <https://www.deepseek.com>.

2. OpenAI ChatGPT

OpenAI. (2023). ChatGPT: A Language Model for Text Generation and Editing. Diakses dari <https://www.openai.com/chatgpt.13>

PENUTUP

Pemanfaatan energi nuklir kini menjadi salah satu wacana strategis Indonesia dalam menghadapi kebutuhan energi yang terus meningkat dan komitmen menuju sistem energi rendah karbon sebagaimana diarahkan dalam RUPTL terbaru. Buku ini hadir untuk memberikan pemahaman ilmiah, berimbang, dan mudah diakses bagi masyarakat, akademisi, dan praktisi energi mengenai teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN).

Melalui penyusunan yang bertahap, buku ini mengajak pembaca memahami dasar fisika nuklir, cara kerja reaktor, siklus bahan bakar, keselamatan, dampak lingkungan, serta perbandingan teknologi reaktor yang berkembang di dunia. Pembahasan kemudian berkembang pada isu-isu strategis seperti ekonomi PLTN, kebijakan nasional, integrasinya dengan energi terbarukan, serta kesiapan SDM dan infrastruktur yang dibutuhkan. Bagian akhir buku memperkenalkan teknologi masa depan SMR, reaktor Generasi IV, dan inovasi dalam dekomisioning, limbah, serta sistem hybrid energi yang semakin relevan bagi arah pembangunan energi Indonesia.

Isi buku ini menunjukkan dengan jelas bahwa teknologi PLTN modern telah mengalami transformasi besar dari sisi desain, keselamatan, dan efisiensi. Namun, setiap keputusan terkait pengembangan PLTN harus tetap ditempatkan dalam konteks kesiapan nasional: regulasi yang kuat, SDM yang mumpuni, lingkungan kebijakan yang stabil, dan dukungan publik yang memahami manfaat serta risikonya secara objektif.

Sebagai materi pendukung Program Awareness PLTN dan Program Berkelanjutan, buku ini diharapkan menjadi jembatan awal untuk memperkuat literasi publik dan membuka ruang dialog yang sehat mengenai masa depan energi Indonesia. Perjalanan literasi nuklir masih panjang, dan partisipasi semua pihak sangat dibutuhkan untuk terus menyempurnakan pemahaman kolektif bangsa terhadap teknologi yang penuh potensi ini.

Kami menyadari bahwa buku ini masih memiliki kekurangan. Oleh karena itu, kritik, saran, dan kontribusi dari pembaca sangat kami harapkan agar edisi berikutnya dapat lebih lengkap, lebih mendalam, dan lebih bermanfaat bagi pengembangan kapasitas nasional di bidang energi nuklir.



PROFIL PENYUSUN



Ir. Heru Sriwidodo S., MM., IPU

Praktisi di Bidang Ketenagalistrikan

Ir. Heru Sriwidodo S., MM., IPU,

Adalah praktisi di bidang ketenagalistrikan dengan pengalaman lebih dari 30 tahun. Pendidikan Teknik Nuklir UGM (1983) dan Magister Manajemen ITB (2001).

Beliau menempati berbagai posisi di PT PJB dan PT PLN, diantaranya : General Manager PLTA Brantas (2009), PLTA Cirata (2011), PLTU & PLTGU Gresik (2012) & Senior Manajer Diklat PJB (2014). Serta Senior Manager Energi Baru Terbarukan PLN, General Manager Proyek Pembangkit PLN (2015), General Manager Pusat Sertifikasi PLN (2017), Staf Ahli Direktur Human Capital & Management PLN (2020)

Pasca pensiun, beliau aktif sebagai Senior Konsultan PT BEST (YPK PLN), Komisaris PT SKP (ptskp. id), Konsultan, Penulis dan trainer di bidang terkait. Selain itu, merintis Pondok Qtadabbur sebagai tempat Healing, Refresing spiritual dan training inspirasi Qur'an di Ngargoyoso, Karanganyar, Jateng.

Tinggal di "Rumah Syukur" Solo, dan dapat dihubungi melalui email : heru.sriwidodo@gmail.com & WA: 082129590777

PROFIL PENYUSUN

A professional portrait of Dr. Ir. H. M. Ahsin Sidqi, MM, IPU, ASEAN Eng. QRGP. He is a middle-aged man with dark hair and glasses, wearing a dark blue suit, a white shirt, and a blue patterned tie. He is standing with his arms crossed, smiling at the camera. The background is a solid teal color.

**Dr. Ir. H. M. Ahsin Sidqi, MM, IPU,
ASEAN Eng. QRGP**

Insinyur Nuklir Profesional, Ahli bidang
Pembangkit Listrik

Dr. Ir. H. M. Ahsin Sidqi, MM, IPU, ASEAN Eng. QRGP

Insinyur Nuklir Profesional, Ahli bidang Pembangkit Listrik dengan fokus pada manajemen energi, rantai produksi, dan energi terbarukan. Menggabungkan pengalaman 30+ tahun di sektor energi dengan kepakaran akademis dalam manajemen strategis. Karyanya berfokus pada integrasi tata kelola berkelanjutan, inovasi energi bersih, dan peningkatan daya saing nasional melalui transisi energi.

Visinya: Menyiapkan talent terbaik bangsa untuk mewujudkan kedaulatan energi Indonesia yang berwawasan lingkungan.

Pengalaman Profesional :

1. Wakil Rektor IV Kerjasama dan USAHA Dosen Institut Teknologi PLN (2022-sekarang)
2. Anggota Dewan Pakar Masyarakat Kelistrikan Indonesia (MKI 2022- Sekarang)
3. Komisaris Utama PT. Adhi Guna Putera (2022- Sekarang)
4. Anggota Penguji Insinyur Professional Nuklir BKTN PII (2022 – Sekarang)
5. Direktur Utama PT Indonesia Power (2019–2022):
6. EVP Pengadaan Pembangkit Listrik IPP PT PLN (Persero) (2017–2019):
7. Memimpin pembangkit listrik (gas, uap, panas bumi) di berbagai wilayah, termasuk Sumatera dan Jawa.
8. Pengembangan strategi inovasi berkelanjutan untuk transisi energi menuju Carbon Zero Neutral 2060.

Pendidikan:

1. Doktor Strategic Management, Universitas Trisakti (2016-2019).
2. Magister Manajemen (Marketing), IPWI Jakarta (1999-2001).
3. Sarjana Teknik Nuklir, Universitas Gadjah Mada (1985-1991)

PROFIL PENYUSUN



Ir. Suharto Wiranu, M.T., IPU
Praktisi di Bidang Ketenagalistrikan

Ir. Suharto Wiranu, M.T., IPU

Sebagai seorang dosen yang juga Insinyur Profesional, Ahli di bidang Distribusi Tenaga Listrik dan Sumberdaya Manusia. Dalam bidang Teknik, pengalamannya dalam Manajemen Distribusi dan Penjualan tenaga listrik. Sedangkan untuk non Teknik pengalamannya dalam Pengembangan Sumber Daya Manusia mulai dari Rekrutmen, Pengembangan Karir/ Talenta dan Manajemen Training.

Pengalaman Profesional :

1. Direktur Training Center ITPLN (2023-sekarang)
2. Dosen Fakultas Ketenagalistrikan & Energi Terbarukan ITPLN (2024-sekarang)
3. Ketua Bidang Litbang dan Sosialisasi Masyarakat Kelistrikan Indonesia (MKI) Wilayah Jatim (2023-sekarang)
4. Anggota Dewan Pakar IKPLN (2025-sekarang)
5. Direktur SDM PT Pembangkitan Jawa Bali (2016-2020)
6. Kepala Divisi Pengembangan Talenta PT PLN (Persero) (2014-2016)
7. General Manager Corporate University PT PLN (Persero) (2011-2014)
8. General Manager Wilayah Sumatera Barat PT PLN (Persero) (2011-2011)
9. Asesor Kompetensi Bidang Distribusi, Bidang Penjualan (DJK) dan Bidang SDM (BNSP) (2020-sekarang)

Pendidikan:

1. Magister Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember (1999-2001)
2. Sarjana Teknik Elektro Universitas Sumatera Utara (1980-1986)
3. Insinyur Profesional Universitas Gajah Mada (2018-2019).

Transisi energi membawa Indonesia pada babak baru pencarian sumber listrik yang bersih, andal, dan berkelanjutan. Dalam RUPTL terbaru, PLTN mulai muncul sebagai salah satu opsi. Topik ini memunculkan rasa ingin tahu, sekaligus banyak pertanyaan: apa sebenarnya energi nuklir itu, bagaimana keselamatannya, dan apa perannya bagi masa depan energi kita?

Buku "Awareness & Teknologi PLTN" literasi untuk menjawab berbagai hal mengenai energi nuklir, pembaca diajak memahami apa itu PLTN, dasar-dasar kerja reaktor, bagaimana keselamatan menjadi bagian inti dari desainnya, serta bagaimana teknologi ini berkembang mengikuti kebutuhan zaman.



“

Buku yang sangat menarik dan mudah dipahami, sangat diperlukan untuk semua kalangan dapat memahami peran PLTN dalam format energi bersih kedepan yg dapat diandalkan dalam mencapai Nett Zero Emission.

Dr Ir Agus Puji Prasetyono, M.Eng.,
IPU., ASEAN Eng., APEC Eng.
Chairman GINEST

”



“

Buku hasil kolaborasi ITPLN dengan PLN Puslitbang serta seluruh pihak yang terlibat ini sangat inspiratif. Semoga buku ini memberikan manfaat bagi mahasiswa, praktisi energi, dan masyarakat dalam membangun pemahaman yang objektif tentang masa depan energi Indonesia.

Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa M.K, M.T.,IPU., ASEAN Eng., APEC Eng
Rektor Institut Teknologi PLN (ITPLN)

”



“

Dalam kerangka RUPTL 2025-2034, kajian terhadap berbagai opsi energi bersih perlu didukung oleh literasi yang memadai, mencakup aspek teknologi, keselamatan, regulasi, dan kesiapan sumber daya manusia. Buku tentang energi baru Nuklir ini diharapkan menjadi referensi awal yang membantu membangun perspektif yang berimbang dan berbasis sains.

Mochamad Soleh, ST., MT., IPM
General Manager PLN Puslitbang

”