

**KAJIAN RISIKO KOMPARATIF
TERHADAP PEMBANGKITAN LISTRIK BATUBARA DAN NUKLIR**

Sunarko¹⁾

ABSTRAK

KAJIAN RISIKO KOMPARATIF TERHADAP PEMBANGKITAN LISTRIK BATUBARA DAN NUKLIR. Penelitian ini mengkaji hasil-hasil studi perbandingan risiko dalam pembangkitan listrik yang pernah dilakukan; terutama terhadap jenis pembangkit berbahan-bakar batubara dan pembangkit nuklir. Risiko yang dihitung meliputi risiko terhadap pekerja dan publik di sekitar pembangkit. Risiko tersebut memperhitungkan setiap tahapan dalam pembangkitan listrik, mulai dari tahap ekstraksi bahan-bakar, transportasi bahan-bakar, hingga operasi pembangkit. Khusus untuk kasus pembangkit listrik tenaga nuklir, ikut pula disertakan risiko dalam pemrosesan ulang (*re-processing*) dan pengelolaan limbah. Kajian ini menitikberatkan pada pembangkit listrik tenaga batubara dan nuklir, mengingat peran batubara yang akan semakin meningkat di Indonesia dan tersedianya potensi pembangkitan listrik tenaga nuklir untuk pemenuhan beban dasar kebutuhan listrik di Jawa, Madura, dan Bali. Disimpulkan bahwa tidak ada pembangkitan listrik yang tidak membawa dampak negatif terhadap lingkungan dan bahwa PLTN memiliki risiko yang relatif lebih kecil terhadap pekerja dan masyarakat daripada PLTU batubara dalam hal risiko kematian, cedera, sakit dan kehilangan jam kerja, bahkan termasuk risiko paparan terhadap unsur radioaktif dan penyakit-penyakit yang menyertainya.

ABSTRACT

COMPARATIVE RISK ASSESSMENT ON COAL AND NUCLEAR POWER GENERATION. This paper discusses the result of different studies on the comparative risk associated with different mode of power generations, especially fossil fueled coal power plant and nuclear power plant. The risk term includes that of the public around the power plant and the worker. Risk is considered in all stages including fuel extraction, transportation, and plant operation. In the case of nuclear power, the risk in fuel re-processing is also being considered. The assessment is focused on coal and nuclear power plant primarily because the role of coal power will increase in the future to meet the demand in Java, Madura, and Bali, and the presence of nuclear generation technology as an alternative source of electricity. It is concluded that all mode of electricity generation poses some risk (negative impact) to the environment. It is also a fact that nuclear generation poses smaller risk to the worker and public compared to coal generation in terms of death, injuries, illnesses, and worktime loss, including the risk toward radioactive exposure and subsequent diseases.

¹⁾ Staf Bidang Penerapan Sistem Energi P2EN

I. PENDAHULUAN

Risiko secara umum dapat didefinisikan sebagai kemungkinan atau potensi kerugian yang dapat ditimbulkan oleh suatu bahaya (*hazard*) tertentu yang dapat berakibat atau berdampak pada kematian, cedera, dan sebagainya. Bahaya sendiri adalah suatu situasi yang mungkin terjadi dan apabila benar terjadi dapat menimbulkan kondisi yang tidak diinginkan. Risiko merupakan perwujudan dari konsekuensi yang tidak diinginkan dalam kehidupan, kesehatan, atau lingkungan manusia. Berikut ini adalah beberapa definisi dari risiko:

Risk n [C,U] (instance of) possibility or chance of meeting danger, suffering loss, injury, etc. (Oxford Advanced Learner's Dictionary of Current English, AS Hornby)

Risk n. chances of danger or loss, particularly of property covered by an insurance policy, or property being used or transported by another. Insurance companies assume the risk of loss and calculate their premiums by the value and the risk based on statistically determined chances (Legal Dictionary, Farflex).

Tidak dapat dibantah bahwa pemanfaatan energi listrik adalah aktivitas yang mengandung risiko namun telah memberikan manfaat yang sangat besar dan telah memperbaiki taraf hidup manusia dengan sangat drastis. Namun seperti halnya kegiatan manusia lainnya, pembangkitan listrik juga menghasilkan dampak negatif terhadap lingkungan. Meninggalkan penggunaan listrik untuk menghindari dampak negatif bukanlah merupakan pilihan yang masuk akal. Namun, publik atau individu seharusnya tidak menerima dampak negatif yang lebih besar daripada dampak positif dari suatu kegiatan.

Dalam proses pengambilan keputusan, seringkali pengambil keputusan dipengaruhi oleh opini publik atau stigma yang berkembang dimasyarakat mengenai jenis pembangkit listrik yang dapat atau tidak dapat dibangun. Meskipun demikian, pengambilan keputusan tetap harus didasarkan pada data-data dan kajian-kajian ilmiah terhadap berbagai opsi pembangkitan energi listrik.

II. METODOLOGI

Tulisan ini membahas risiko dari kegiatan pembangkitan listrik terhadap manusia dan lingkungan berdasarkan referensi-referensi kajian risiko dari berbagai sumber berdasarkan pada studi literatur. Dengan keterbatasan bahan literatur, maka tidak setiap jenis pembangkitan dibahas secara mendalam. PLTN dan PLTU batubara menjadi perhatian utama karena pada saat ini, pemanfaatan mode pembangkitan ini termasuk yang dominan di Indonesia (36% kapasitas terpasang) dan negara-negara lain di dunia.

Proporsi energi batubara terhadap total energi dunia berkisar pada angka 30% ^[1]. Untuk kasus Indonesia, konsumsi batubara pada tahun 2002 mencapai 29 juta MT dimana 65% diantaranya dikonsumsi oleh PLTU Batubara sementara sisanya dipergunakan untuk pabrik semen dan keperluan non-industri ^[2]. Pada 5 tahun berikutnya Departemen Energi dan Sumberdaya Mineral memperkirakan bahwa konsumsi akan meningkat sampai 35 juta MT per tahun dengan beroperasinya PLTU Tanjung Jati B, Sibolga, dan Amurang.

Dalam setiap kasus yang ditinjau, dampak atau risiko dari seluruh siklus berupa tahapan kegiatan seperti penambangan (ekstraksi bahan-bakar), transportasi bahan-bakar, dan operasi ikut dipertimbangkan. Misalnya, efek dari pembangkit listrik fosil dampak pembakaran bahan bakar fosil secara langsung dan juga dampak terhadap lingkungan dari penambangan minyak dari dalam bumi. Dampak dari fabrikasi material yang dipakai dalam pembangkitan listrik (logam, beton, dsb) juga dipertimbangkan, sehingga risiko yang ditimbulkan merupakan risiko utuh dari seluruh kegiatan.

III. BERBAGAI SISTEM PEMBANGKITAN DAN DAMPAKNYA TERHADAP LINGKUNGAN

III.1. Pembangkit Berbahan Bakar Fosil

Bahan bakar fosil terdiri dari batubara, minyak dan gas alam. Bahan bakar fosil dibakar untuk memanaskan air dalam bejana untuk menghasilkan uap. Uap yang dihasilkan akan memutar turbin dan menghasilkan listrik. Dampak lingkungan terbesar dari penggunaan bahan bakar fosil adalah lepasan substansi seperti arang, CO₂, nitrogen oksida, sulfur dioksida, abu dan abu terbang (*bottom* dan *fly ash*), sulfur, dan juga logam berat seperti timah hitam, arsenik, nikel, berilium, timbal, dan kadmium.

Akibat dari emisi di atas, dua masalah utama dapat ditimbulkan yaitu efek rumah kaca dan hujan asam. Orang-orang yang terlibat langsung dengan ekstraksi bahan bakar dari dalam bumi juga terkena dampak. Di Indonesia, ekstraksi batubara diperkirakan telah merusak lebih dari 70.000 hektar lahan ^[3]. Pada akhirnya, dampak yang berat timbul dari produksi material yang dipakai untuk pengambilan, transportasi, dan penyimpanan bahan bakar dan juga pembangunan dari pembangkit itu sendiri.

Selain dampak diatas, pembakaran bahan fosil seperti batubara ternyata juga menghasilkan paparan radiasi terhadap lingkungan. Bahkan, paparan dari bahan fosil secara umum lebih besar daripada paparan dari pembangkit listrik tenaga nuklir. Hal ini tentu berlawanan dengan anggapan umum bahwa hanya PLTN saja yang menghasilkan radioaktivitas yang berbahaya bagi lingkungan. Pada kenyataannya, PLTU batubara cenderung memberikan paparan yang lebih besar per individu kecuali untuk organ seperti kelenjar gondok yang hanya mencapai 1,9 mrem/th. Dosis individu maksimum yang diterima oleh masyarakat sekitar PLTN terlihat lebih tinggi yaitu 3,2 mrem/th karena adanya lepasan Iodium radioaktif (I-131), seperti tertera pada Tabel 1. Lepasannya

radionuklida utama yang dikeluarkan oleh PLTU batubara selama satu tahun adalah berupa Radium-226 dan Radium-228.

Tabel 1. Paparan radiasi terhadap lingkungan dari PLTU batubara dan PLTN

Organ	Dosis Individu Maximum (mrem/th) *		Dosis Populasi** Max. (org-rem/th)			
	PLTU Batubara	PLTN (PWR)	PLTU-BB***			PLTN (PWR)
			Tinggi Cerobong			
			325 ft	650 ft	975 ft	
Seluruh badan	1,9	1,8	21	19	18	13
Tulang	18,2	2,7	225	192	180	20
Paru-paru	1,9	1,2	29	23	21	9
Kelenjar Gondok	1,9	3,8	21	19	18	12
Ginjal	3,4	1,3	50	43	41	9
Hati	2,4	1,3	29	26	25	10
Sumsum	2,7	1,1	34	31	29	8

Sumber: The Nuclear Fuel Cycle, Cochran et.al.^[4]

* Satuan dosis terdahulu, digunakan hanya sebagai bahan perbandingan

** Hingga radius 55 mil dari tapak Midwestern dengan populasi 3,5 juta

*** 1 % lepasan dengan kandungan 1 ppm uranium dan 2 ppm thorium

III.2. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

Pembangkit listrik tenaga air menghasilkan listrik dengan mengubah energi potensial air menjadi energi listrik, dimana air yang dikumpulkan dalam suatu bendungan atau reservoir sampai pada ketinggian tertentu akan digunakan untuk memutar turbin yang selanjutnya menghasilkan energi listrik. Pada umumnya pembangkit jenis ini memerlukan lahan yang sangat luas.

Dampak lingkungan dari PLTA meliputi (1) perubahan ekologi pada lokasi pembangunan dam, (2) dampak dari produksi sejumlah besar material yang diperlukan untuk konstruksi bendungan (beton, baja, dsb), dan (3) dampak dari jebolnya bendungan yang pernah terjadi beberapa kali diberbagai belahan dunia.

III.3. Geothermal

Energi geothermal berasal dari dalam bumi dan ditemukan dalam berbagai bentuk seperti uap kering, air panas, dan batuan panas. Sumber energi ini dapat dipakai dengan efisiensi yang bervariasi dan ekonomis untuk membangkitkan listrik.

Pada tingkat lokal, listrik geothermal tidaklah tanpa dampak. Polusi suara dan udara dari hidrogen sulfida yang berbau kurang sedap, amonia, dan luaran lainnya merupakan dampak yang tidak ringan. Polusi terhadap air tanah permukaan dapat pula terjadi sebagai akibat dari pembuangan limbah cair. Terdapat pula kemungkinan masalah

penurunan permukaan tanah karena pengosongan cairan didalam bumi yang dapat menyebabkan keretakan dan lubang pada permukaan bumi.

III.4. Energi Surya

Energi surya berpotensi untuk membangkitkan panas dan mendinginkan bangunan dan juga membangkitkan listrik dengan menggunakan kolektor energi yang sama. Pemanasan dan pendinginan surya telah mencapai tahapan komersial dan ekonomis di banyak daerah di dunia. Pembangkitan listrik menggunakan surya merupakan masalah lain. Apakah dengan menggunakan siklus uap atau konversi energi langsung, listrik dengan tenaga surya masih termasuk mahal dibandingkan dengan sumber lain serta masih terbatas oleh kondisi cuaca lokal. Salah satu masalah penggunaan energi surya adalah perilaku difusinya. Dampak lingkungan dari pembangkitan listrik tenaga surya adalah:

1. kemungkinan dampak terhadap ekologi lokal jika daerah yang cukup luas tertutupi oleh kolektor. Diperkirakan bahwa sebuah pembangkit 1000-MW(e) memerlukan luasan sebesar 16 s/d 20 mil persegi.
2. dampak berat lainnya dapat diakibatkan oleh produksi dari material yang digunakan. Sel fotovoltaik memerlukan jumlah silikon yang besar dan produksi silikon adalah proses yang memerlukan energi listrik dalam jumlah yang sangat besar.

III.5. Sumber Energi Lainnya

Gelombang laut: gelombang dipakai untuk membangkitkan listrik dengan daya 240 Mwe di La Rance, Perancis. Pembangkit semacam ini tidak banyak digunakan di negara lain meskipun telah dilakukan berbagai studi. Prinsip kerja dari pembangkit ini adalah dengan memanfaatkan pasang naik dan surut dengan membendung sebuah teluk sehingga membentuk sebuah basin atau perangkap air. Turbin ditempatkan dalam struktur bendungan (*barrage*) sehingga perbedaan ketinggian air pada saat pasang naik atau turun akan memutar turbin dan membangkitkan listrik. Ide ini sementara ditinggalkan karena pembangkit semacam ini tidak ekonomis dan kurang dapat diterima dari sisi lingkungan. Dampak lingkungan dari pembangkit jenis ini meliputi berkurangnya salinitas rata-rata di daerah basin, terjadinya sedimentasi yang mengakibatkan gangguan terhadap ekosistem maupun operasi dari *barrage*, terkumpulnya polutan karena dispersi yang menjadi terbatas, dan matinya ikan karena kavitasi, terpotong baling-baling turbin, dsb. Estimasi mengindikasikan bahwa pembangkit seperti ini akan berharga tiga sampai lima kali lebih mahal daripada PLTN.

Angin: angin dapat dipakai untuk membangkitkan listrik dengan menggerakkan generator secara langsung. Jumlah energi yang didapatkan cukup besar namun tersebar dan tidak konsisten. Beberapa negara berusaha mengembangkan generator angin yang cocok untuk membangkitkan listrik namun biaya yang diperlukan terlalu mahal dan tidak

cukup handal. Kincir angin menimbulkan dampak lingkungan yang berat melalui material yang dipakai dalam konstruksinya, polusi suara yang dihasilkan dan potensi kecelakaan berupa patahan baling-baling yang dapat terbang seperti misil. Disamping itu, jenis pembangkit seperti ini memerlukan luasan lahan yang teramat besar ($1700 \text{ km}^2/\text{Gwe}$) seperti terlihat pada Tabel 2. Dalam tabel ini terlihat bahwa pembangkit dengan tenaga nuklir hanya memerlukan lahan sebesar $0,063 \text{ km}^2/\text{Gwe}$ dan paling kecil dibandingkan dengan pembangkit jenis lain.

Tabel 2. Kebutuhan lahan untuk berbagai jenis pembangkit.

Jenis pembangkit	Kebutuhan lahan $\text{km}^2/\text{GW(e)}$
Batubara	2,4
Minyak	0,87
Gas	1,5
Nuklir	0,063
Hidro	265
Surya	100
Angin	1700

Fusi: fusi nuklir (penggabungan dua inti atom untuk menghasilkan energi) mungkin merupakan sumber energi yang ideal untuk masa mendatang, namun bagian besar dari riset masih harus dilakukan sebelum dapat ditentukan kelayakan teknisnya. Departemen Energi Amerika Serikat (US DOE) memperkirakan teknologi ini belum akan tersedia sebelum 2050. Reaktor fusi generasi pertama menggunakan deuterium-tritium yang dapat menghasilkan sampah radioaktif dan tritium dalam jumlah besar. Selain itu pembangunan reaktor fusi dengan tipe pengungkung magnetik juga memerlukan material dalam jumlah yang sangat besar.

III.6. PLTN dan Dampaknya Terhadap Lingkungan

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) telah membuktikan dirinya sebagai pembangkit yang handal. Menurut data IAEA^[6], hingga akhir Januari 2004 terdapat 442 buah reaktor yang beroperasi dengan kapasitas terpasang sebesar 368,611 GW(e). Total pembangkitan listrik nuklir di dunia mencapai 184,4 TWh (IEA). Sementara itu, 31 buah reaktor masih dalam tahap pembangunan. Fisi nuklir atau pembelahan inti atom untuk menghasilkan energi adalah proses yang sangat stabil dan dapat diprediksi. Salah satu dari proses yang kompleks tersebut telah difahami dan dapat diperhitungkan dengan tepat.

Disamping sukses yang dicapai oleh PLTN, masih terdapat persepsi publik yang menyatakan bahwa pembangkit nuklir membahayakan lingkungan. Dampak lingkungan yang mungkin ditimbulkan oleh PLTN dapat dikategorikan sebagai berikut:

1. dampak yang ditimbulkan oleh material yang dipakai dalam konstruksi.
2. dampak yang ditimbulkan oleh bahan bakar nuklir (dari penambangan uranium hingga penyimpanan limbah radioaktif)
3. paparan radiasi terhadap pekerja dan masyarakat pada tahap operasi
4. kemungkinan paparan radiasi pada saat terjadi kecelakaan yang dapat berakibat pelepasan produk radioaktif fisi ke lingkungan.
5. dampak dari kegiatan dekomisioning

Dampak pertama berlaku juga untuk jenis pembangkit listrik jenis lain. Berdasarkan daya yang dihasilkannya, pembangkit nuklir bukanlah jenis yang paling padat material dibandingkan dengan PLTA dan listrik tenaga surya (Tabel 2 dan 3). Dampak kedua adalah spesifik untuk pembangkit tenaga nuklir, karena bahan bakarnya bersifat radioaktif. Namun, bukti yang ada mengindikasikan bahwa dampak dari siklus bahan-bakar nuklir terhadap lingkungan (udara, air, tumbuhan, manusia) lebih kecil daripada dampak yang ditimbulkan oleh penggunaan batubara, minyak, dan gas seperti terlihat dalam Tabel 3 dibawah ini:

Tabel 3. Perbandingan Luaran dari Berbagai Tipe Pembangkit Berdaya 1000 MWe/Tahun

	Jenis Bahan-bakar			
	Batubara	Minyak	Gas	Nuklir
Konsumsi BB/tahun	2,3 juta (ton)	9 juta (barel)	64 milyar (ft ³)	30 (ton) *
Lepasan polutan (ton)				
Sulfur oksida	1,4 x 10 ⁵	5,3 x 10 ⁴	14	0
Nitrogen oksida	20860	21769	12245	0
Karbon monoksida	522	9	0	0
Hidrokarbon	209	667	0	0
Aldehida	54	118	32	0
Fly ash (97,5 % disaring)	4490	726	454	0
Lepasan Radionuklida tahunan (Ci)				
Ra-226	0.0172	0.00015	0	0
Ra-228	0.0108	0.00035	0	0
Kr-85 + Xe-133	0	0	0	
Gas mulia (PWR)				600
Gas mulia (BWR)				1,11 x 10 ⁶
I-131 (PWR)				0
I-131 (BWR)				0.85

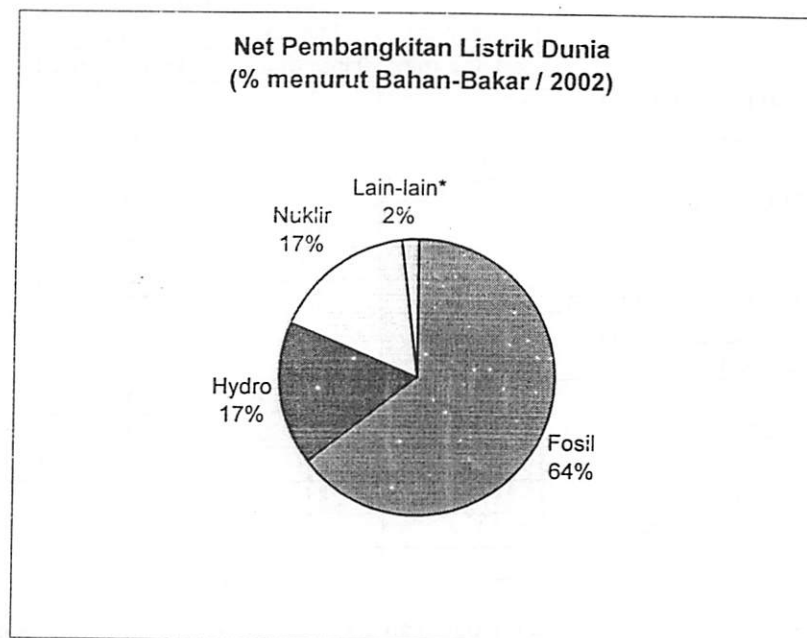
* ~30 ton bahan-bakar nuklir diperlukan untuk pengisian 1/3 dari teras reaktor per tahun.

Dampak ketiga timbul dari operasi karena beberapa lepasan terjadi pada saat operasi, terutama lepasan berupa gas mulia (krypton dan xenon) dan I-131. Sebagai perbandingan, Tabel 3 menunjukkan bahwa PLTU juga menghasilkan lepasan radioaktif secara rutin dan memberikan paparan radiasi terhadap publik, meskipun dosisnya hanya

berkisar antara 1-5% diatas latar dalam 1 km radius, dan dalam beberapa kasus ekstrim sampai 3% untuk kasus PLTU moderen dengan kemampuan retensi materi sisa pembakaran sebesar 99.5% [7]. Dampak ke-empat adalah yang paling kontroversial karena menyangkut kemungkinan yang bersifat probabilistik. Kemungkinan kecelakaan terhadap reaktor yang dapat mengakitbakan pelepasan produk radioaktif ke lingkungan telah dipelajari. US-NRC telah menerbitkan NUREG-1150 yang mewakili studi kajian risiko probabilistik terkini. Perkiraan terhadap kerusakan inti reaktor adalah 10^{-5} hingga 10^{-16} per reaktor per tahun, atau dengan kata lain, kecelakaan yang berakibat pada kerusakan inti mungkin terjadi sekali dalam seribu hingga 1 juta tahun.

IV. PEMBAHASAN

Pada saat ini, metoda yang dipakai membangkitkan listrik adalah melalui pembakaran bahan bakar fosil (batubara, minyak, dan gas alam), energi nuklir serta tenaga air. Pembangkit lain (terbarukan) masih menghasilkan listrik dalam jumlah yang belum signifikan (2 % total dunia, Gambar 1). Pembangkit energi berbahan-bakar fosil (batubara, minyak, gas) masih memegang peran didunia (64%) yang diikuti oleh pembangkit energi nuklir yang berada di posisi kedua (17%).



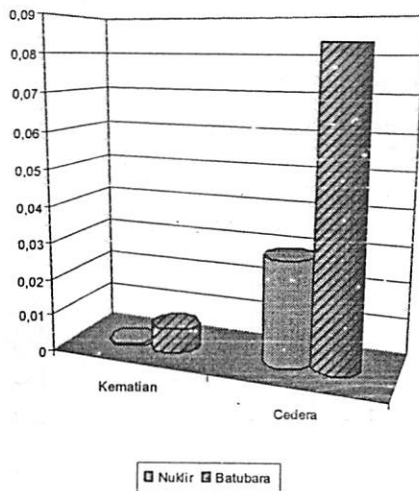
* Lain-lain: geothermal, surya, angin, kayu dan limbah

Gambar 1. Total Pembangkitan Listrik Dunia (EIA)^[9]

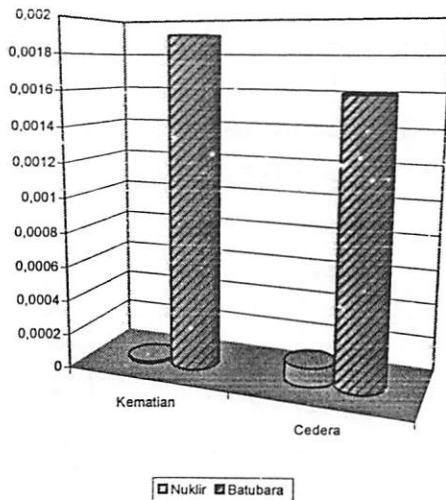
Pertimbangan dan pemikiran telah dilakukan terhadap luaran dari berbagai bahan bakar seperti yang diutarakan terdahulu. Sebagaimana diketahui luaran akibat pembakaran fosil dapat mengakibatkan hujan asam dan efek rumah kaca. Efluen yang dilepaskan secara rutin oleh PLTN dan PLTU dibandingkan dalam tabel 3. Perlu dicatat bahwa PLTN tidak menghasilkan polusi udara dan menggunakan jumlah bahan-bakar yang lebih kecil. Selain itu, sejumlah radiasi yang dikeluarkan oleh PLTN berada dalam bentuk gas mulia, sedangkan dari PLTU terdiri dari unsur berat seperti uranium, yang merupakan sumber radiasi yang lebih berbahaya.

V. RISIKO TERHADAP PEKERJA DAN PUBLIK

Inhaber^[8] dalam *Energy Risk Assessment* (1982) (mempergunakan referensi per Mwe-tahun dengan faktor kapasitas pembangkit sebesar 70%, Tabel 4,5) menunjukkan bahwa dari sisi kejadian kecelakaan, risiko kematian atau cedera untuk kedua tipe pembangkitan menunjukkan bahwa tipe pembangkitan nuklir memiliki total risiko jauh lebih kecil terhadap pekerjaannya maupun terhadap publik. Gambar 2 s/d 7 menggambarkan risiko maksimum dari kisaran total risiko yang diberikan dalam Tabel 4 s/d 8.



Gambar 2. Risiko Kecelakaan – Pekerja

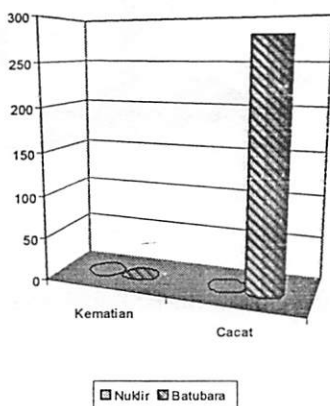


Gambar 3. Risiko Kecelakaan - Publik

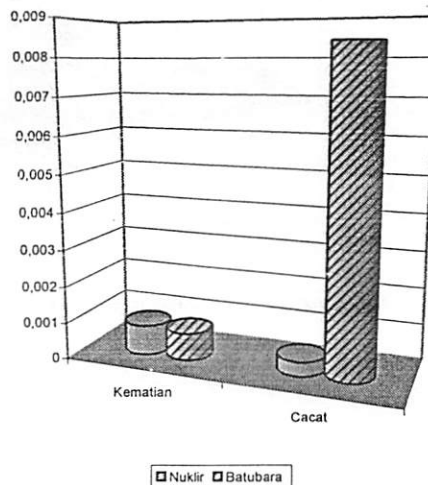
Pada kasus pekerja (Gambar 2), kontributor utama kasus kematian dan cedera adalah fase ekstraksi dan transportasi bahan-bakar. Tahapan operasi dan pengelolaan limbah bukan kontributor utama risiko dan untuk pembangkit nuklir, angka risiko dari kombinasi operasi dan pengelolaan limbah masih lebih rendah daripada fase operasi dari pembangkit batubara. Bagi publik (gambar 3), rasio risiko kecelakaan antara pembangkit nuklir dan batubara jauh lebih besar lagi (1:>150 untuk kasus kematian dan 1:14 untuk kasus cedera). Risiko terhadap publik ini diakibatkan oleh fase transportasi bahan bakar, dimana untuk kasus nuklir secara komparatif memang memiliki volume bahan-bakar yang sangat kecil.

Risiko terhadap penyakit juga menunjukkan kecenderungan yang sama, dimana risiko penyakit yang dapat mengakibatkan cacat didominasi oleh tipe batubara, meskipun bila dilihat dari risiko kematian akibat penyakit, tipe nuklir dan batubara tidak jauh berbeda. Hal ini disebabkan karena pembangkitan batubara memang mengeluarkan berbagai emisi gas maupun partikel yang disebarkan melalui atmosfer kepada publik yang meskipun tidak sampai mengakibatkan kematian namun berdampak serius pada kesehatan (Gambar 4,5).

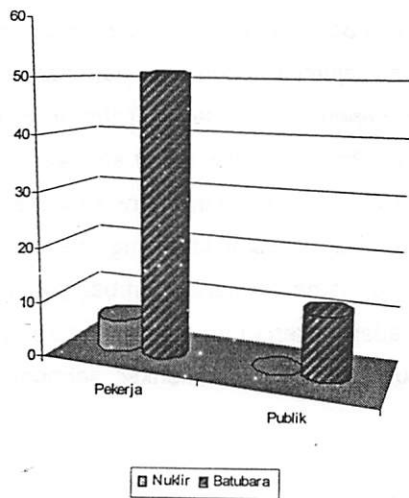
Kerugian lain terletak pada hilangnya jam kerja (OH), dimana jumlah yang hilang untuk kasus kecelakaan dan akibatnya terhadap pekerja pada pengoperasian PLTU adalah hampir sepuluh kali lebih besar daripada PLTN seperti terlihat pada Gambar 6. Risiko publik terhadap penyakit memberikan gambaran yang relatif sama untuk kedua kasus (Gambar 7). Risiko terhadap publik menunjukkan bahwa akibat yang ditimbulkan oleh PLTU juga lebih buruk, dimana publik yang terkena paparan dari luaran PLTU lebih rentan terkena penyakit seperti infeksi saluran pernapasan atas, yang berakibat pada hilangnya jam kerja maupun cedera.



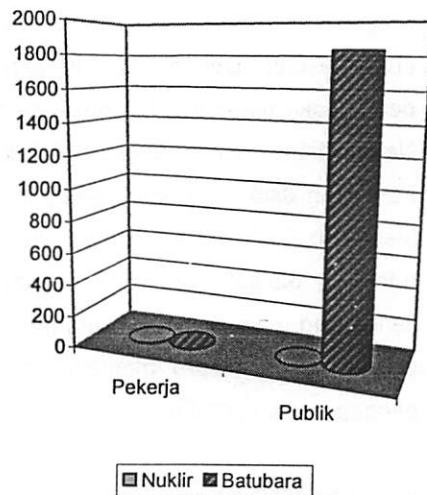
Gambar 4. Risiko Penyakit - Pekerja



Gambar 5. Risiko Penyakit - Publik



Gambar 6. Kerugian Jam Kerja (OH) Disebabkan Kecelakaan



Gambar 7. Kerugian Jam Kerja (OH) Disebabkan Penyakit

Kontribusi terbesar pada hilangnya jam kerja bagi pekerja adalah pada tahapan ekstraksi bahan bakar / penambangan baik untuk kasus PLTU maupun PLTN, dimana seringkali terjadi kecelakaan kerja dan paparan terhadap sumber penyakit seperti debu batubara dan silikat. Pada pertambangan batubara, pekerja rentan terpapar penyakit seperti *pulmoconiosis* (paru-paru hitam / *black-lung disease*). *Pulmoconiosis*, dikenal juga dengan nama *anthracosis*, *miner's asthma*, atau *silicosis*, terdiri dari kasus simpel sampai dengan komplikasi yang mengakibatkan *massive fibrosis*, suatu kerusakan paru-paru atas karena debu batubara dan silikat, yang pada dasarnya tidak dapat disembuhkan^[9]. Beberapa pasien menderita *emphysema* atau kerusakan pada pembuluh udara paru-paru yang berakibat pada kesulitan bernapas hingga gagal jantung karena pembesaran bilik sebelah kanan.

Selain pada fase penambangan, pada kasus PLTU, tahapan transportasi bahan-bakar juga memiliki angka risiko yang signifikan karena volume material yang jauh lebih besar daripada bahan-bakar nuklir. Ditinjau dari akibat terhadap publik, kerugian oleh PLTU mayoritas diakibatkan oleh kegiatan transportasi bahan-bakar dan operasi pembangkit, dimana terdapat paparan terhadap polutan seperti sulfur oksida maupun debu terbang (*fly-ash*). Meskipun transportasi bahan-bakar nuklir berdampak terhadap publik, nilai besarnya sangatlah kecil apabila dibandingkan dampak yang ditimbulkan

PLTU untuk semua akibat seperti kematian, cedera, hilangnya jam kerja, maupun kecacatan.

Cohen dan Pritchard^[10] membagi dampak yang ditimbulkan dalam tiga tahapan produksi yaitu ekstraksi bahan bakar, transportasi bahan-bakar, dan operasi pembangkit (Tabel 7,8,9). Dalam tiap tahapan disertakan sejumlah penelitian dan kasus untuk pembangkit batubara dan nuklir serta minyak, seperti tertera dalam Tabel 4, 5, dan 6. Namun hanya angka-angka untuk pembangkitan batubara dan nuklir saja yang diulas. Penelitian dilakukan untuk pembangkit kelas 1000 Mwe dengan faktor kapasitas 75%. Meskipun tidak dapat dibandingkan angka-per-angka secara langsung, namun kedua referensi diatas memiliki kecenderungan yang sama, dimana pembangkitan nuklir cenderung memiliki risiko yang lebih kecil terhadap pekerja dan publik. Secara spesifik, Cohen dan Pritchard memasukkan kasus pulmoconiosis dan kanker sebagai akibat pengoperasian pembangkit.

VI. KESIMPULAN

Berdasarkan pada kebijakan energi yang menekankan pada diversifikasi maka diperlukan strategi pemenuhan energi yang tepat sehingga dampak lingkungan yang diakibatkan oleh pembangkitan listrik dapat ditekan seminimal mungkin atau manfaat yang diperoleh lebih besar daripada kerugian yang diakibatkan. Pengambilan keputusan mengenai tipe pembangkit listrik yang akan digunakan seringkali dipengaruhi oleh opini publik dan situasi politik. Namun demikian, pengambilan keputusan haruslah tetap didasarkan pada perhitungan obyektif dari kajian ilmiah mengenai opsi-opsi energi. Semua tahapan pembangkitan listrik harus dipertimbangkan, bahkan apabila kejadiannya berlangsung di dalam suatu negara atau di batas regional lain.

Berdasarkan data dari studi yang pernah dilakukan dapat diperoleh kesimpulan bahwa:

1. pembangkit listrik dengan menggunakan teknologi nuklir dan batubara tetap mengandung risiko atau dampak lingkungan.
2. ditinjau dari tahapan-tahapan dalam pembangkitan energi listrik, tahapan ekstraksi dan transportasi bahan-bakar merupakan kontributor utama pada kecelakaan kerja yang berakibat pada kematian, cedera, maupun kerugian jam kerja.
3. berbeda dengan persepsi publik, apabila risiko dari semua tahapan pembangkitan diperhitungkan, PLTN memiliki total risiko yang lebih kecil, baik terhadap pekerja maupun publik, bila dibandingkan dengan PLT batubara.

DAFTAR PUSTAKA

1. Ogawa, Yoshiki, 2002, Impact of Kyoto Mechanism on Coal, presented in the 8th APEC Coal Flow Seminar, March 4.
2. De Souza, Jair Albo Marques, 2002, The Environmental Advantages of Nuclear Power, LAS-ANS Symposium 2002, Power Supply and Its Problems The Nuclear Proposal, Rio de Janeiro 17-20 June 2002.
3. The Embassy of the USA-Jakarta, 2000, Coal Report Indonesia 2000, October.
4. Cochran, Robert G., Tsoulfanidis, Nicholas, 1992, The Nuclear Fuel Cycle: Analysis and Management, American Nuclear Society.
5. 2002, Coal Production Increases in 2002, www.usembassyjakarta.org/econ/coal_prod2002.htm,
6. Merck and Co., Inc., 1992, *The Merck Manual*, 6th ed, edited by Robert Berkow, et. al. Rahway, N.J.
7. Inhaber, H., 1982, Energy Risk Assessment, Gordon & Breach, New York.
8. A.V. Cohen dan D.K. Pritchard, 1981, Comparative Risks of Electricity Production System: A Critical Review of Literature.
9. International Energy Annual 2003, Energy Information Administration (EIA)

Tabel 4. Risiko Yang Timbul Dari Operasi Pltn*

Risiko	Penambangan dan Penanganan Bahan-Bakar	Emisi Sulfur Oksida	Transportasi Bahan-Bakar	Produksi Listrik	Pengelolaan Limbah	Total
Pekerja						
Kecelakaan						
Kematian	(1,2 s/d 5,7) x 10-4		(2,7 s/d 12) x 10-6	(13 s/d 17) x 10-6	5 x 10-6	(3,0 s/d 7,6) x 10-4
Cedera	(3,4 s/d 16) x 10-3		(6,0 s/d 20) x 10-5	1,7 x 10-3	2,7 x 10-4	(16 s/d 29) x 10-3
OH hilang	0,9 s/d 4,2		(1,9 s/d 8,2) x 10-2	0,16 s/d 0,19	0,04	2,5 s/d 6,0
Penyakit						
Kecelakaan						
Cacat	(2,2 s/d 60) x 10-5		(0,3 s/d 40) x 10-7	13 x 10-5	7,4 x 10-5	(2,4 s/d 8,1) x 10-4
OH hilang	(1,1 s/d 1,6) x 10-5		(0,6 s/d 80) x 10-7	(6 s/d 22) x 10-5	1,5 x 10-4	(2,2 s/d 3,9) x 10-4
	0,1 s/d 3,6		(0,2 s/d 25) x 10-3	0,8	0,46	1,6 s/d 4,9
Publik						
Kecelakaan						
Kematian	-		1,2 x 10-5	-	-	1,2 x 10-5
Cedera	-		1,1 x 10-4	-	-	1,1 x 10-4
OH hilang	-		0,08	-	-	0,08
Penyakit						
Kematian	31 x 10-6	(3,6 s/d 10) x 10-6	13 x 10-7	(3 s/d 230 X 10-5	(0,5 s/d 25) x 10-5	(7,0 s/d 52) x 10-5
Cacat	-	0,020 s/d 0,053	44 x 10-8	(7 S/D 260) X 10-7	2,5 x 10-4	0,020 s/d 0,063
OH hilang	0,19	0,13 s/d 0,41	7,8 x 10-3	0,18 s/d 1,4	0,03 s/d 1,5	0,5 s/d 3,5

*Per Mwe-tahun dengan faktor kapasitas 70% (Inhaber, H., Energy Risk Assessment, Gordon & Breach, New York (1982))
OH = Orang-Hari

Tabel 5. Risiko Yang Timbul Akibat Operasi Pitu Batubara*

Risiko	Penambangan dan Pengolahan Bahan-Bakar	Transportasi Bahan-Bakar	Produksi Listrik	Total
Pekerja				
Kecelakaan				
Kematian	0,7 s/d 1,5 x 10-3	(1,6 s/d 5,0) x 10-3	(1,3 s/d 9,0) x 10-5	(2,6 s/d 6,7) x 10-3
Cedera	0,04 s/d 0,07	(1,3 s/d 4,8) x 10-2	(1,6 s/d 8,5) x 10-3	0,056 s/d 0,083
OH hilang	8 s/d 16	10 s/d 32	0,16 s/d 0,97	20 s/d 51
Penyakit				
Kematian	(0 s/d 7,5) x 10-4	-	-	7,5 x 10-4
Cacat	(4,2 s/d 8,4) x 10-3	-	-	(42 s/d 8,4) x 10-3
OH hilang	0,2 s/d 5,0	-	-	0,2 s/d 5,0
Publik				
Kecelakaan				
Kematian	-	(0,8 s/d 1,9) x 10-3	-	(0,8 s/d 1,9) x 10-3
Cedera	-	1,6 x 10-3	-	1,6 x 10-3
OH hilang	-	5 s/d 11,6	-	5 s/d 11,6
Penyakit				
Kematian	(1,4 s/d 14) x 10-3	-	0,016 s/d 0,047	0,017 s/d 0,061
Cacat	-	-	94 s/d 280	94 s/d 280
OH hilang	8,4 s/d 84	-	580 s/d 1750	590 s/d 1830

*Per Mwe-tahun dengan faktor kapasitas 70% (Inhaber, H., Energy Risk Assessment, Gordon & Breach, New York (1982))
OH = Orang-Hari

Tabel 6. Perkiraan Dampak Kesehatan Kerja Dari Ekstraksi Bahan Bakar Untuk Pembangkit Kelas 1000-Mwe Dengan Faktor Kapasitas 75% *

	Batubara			Minyak			Nuklir		
	Kematian (kecelakaan)	Cedera a)	Kematian (Pncs) b)	Kematian (kecelakaan)	Cedera a)	Kematian (kecelakaan)	Kematian (kecelakaan)	Cedera a)	Kanker (kasus / kematian)
HSC	1.05	- c)	~7	0.23		0.075			
Norwegia	2.13	125	-	0.17	4.7	0,05 sd 0,2	1,0 sd 10		
Swedia	1.6	394 (4 sd 20) 219 (21 sd 56) 73 (>56)	2	0.22	26	0.051	16.2	0,06 sd 0,09 d)	
Inhaber (REV-1 dan REV-3)	0,53 sd 1,13	30 sd 52,5	0 sd 2,6	0,11 sd 1,28	11,3 sd 90 (55)	0,06 sd 0,43	2,55 sd 12	0,16 sd 0,45	
WASH 1224	0.98	40,5 (60)	-	0.11	10.5	0.095	5.1		
Comar & Segan e)	0,47 sd 1,03	24,6 sd 52	0 sd 3,5	0,1 sd 1,21	10,5 sd 83	0,053 sd 0,42,4	sd 11,5	0,015 sd 0,43	
Fagnani & Maccia	1.05	1039	-	0.08	11.4	0.12	27	0.07	
Hamilton	0.75	52	0,02 sd 0,46 f)	0,58 sd 1,15 f)	74	0.36	15.3	0.11	
Hamilton	0.64	33 (50)	0 sd 7	1.12	74	0.25	10.6	0.14	
US/NRC g)	0,1 sd 0,66	4 sd 40	-	-	-	-	-	-	
Black & Niehaus	0,50 sd 0,55	2300 hari	0.07	0.29	1980 hari	0,07 h)	143 hari h)	0,003 sd 0,14	
Ramsay i)	0,33 sd 0,99	66 sd 132	3.3	-	-	0,07 sd 0,23	13 sd 23	0,07 sd 0,13	
Kisaran	0,33 sd 2,13	24,6 sd 1039	0 sd 7	0,1 sd 1,28	4,7 sd 90	0,05 sd 0,43	1 sd 27	0,015 sd 0,45	

* A.V. Cohen dan D.K. Pritchard, "Comparative Risks of Electricity Production System: A Critical Review of Literature" (1981)

a) Jumlah rata-rata hari hilang per cedera ditampilkan dalam kurung (...). Data Swedia didasarkan dari data Jerman Barat

b) Pncs: Pneumoconiosis, penyakit paru-paru hitam. Kasus termasuk kasus kematian atau proyeksinya

c) Kosong tidak berarti tidak ada risiko, namun belum diperkirakan, atau perkiraan yang ada tidak dapat dipecah menjadi risiko dalam setiap tahap dari siklus energi termasuk dampak genetik

e) Kapasitas beban pada atau mendekati 75% (ref.)

f) disebut juga penyakit sebagai konsekuensi pekerjaan / occupational disease

g) Batas atas dan bawah adalah untuk penambangan terbuka dan bawah tanah dalam. Asumsi 50% ma digunakan dalam menghitung risiko

h) Termasuk re-prosesing. Kanker untuk pertambangan saja.

i) termasuk kematian dan kecelakaan kerja dalam setiap tahapan dari siklus bahan-bakar. Penambangan batubara: 40-70% tambang terbuka.

Tabel 7. Perkiraan Jumlah Kematian Dan Cedera Dari Transportasi Bahan-Bakar Untuk Pembangkit Kelas 1000-Mwe Dengan Faktor Kapasitas 75% *

	Batubara				Minyak a)				Nuklir			
	Kematian		Cedera b)		Kematian		Cedera b)		Kematian		Cedera b)	
	Pekerja	Publik	Pekerja	Publik	Kematian Pekerja	Cedera Pekerja b)	Pekerja	Publik	Pekerja	Publik	Pekerja	Publik
HSC	0.15	- c)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Inggris	0.03	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Inhaber (REV-1 dan REV-3)	1,2 sd 3,75	0,6 sd 1,43	9,75 sd 36 (93)	12 (93)	0,03 sd 0,11	1,2 sd 9,75 (55)	0,002 sd 0,009	0,009	0,045 sd 0,15 (50)	0,009	0,083 (70)	0,08
Norwegia	0.19	0.3	4	-	0.11	2.2	0	0.01	0.05 sd 0.14	-	-	-
Swedia	0.8	-	236	-	0.34	17	0.002	-	0.045	-	-	-
WASH 1224	0.055	0.55	5.1 (47)	1.17 (171)	0.03	1.1	0.002	0.009	0.045 (25)	0.009	0.08 (75)	0.08
Comar & Sagan d)	0,055 sd 0,4	0,55 sd 1,3	0,33 sd 23	-	0,03	1,1 sd 9	0,002	0,009	0,045 sd 0,14	0,009	-	-
Fagnani & Maccia	0.07	-	13	-	0.12	2.1	0.007	-	1.6	-	-	-
Hamilton	0,35 sd 1,5	-	1,4 sd 6,8	-	-	-	0.011	~0,001	0.11	~0,001	~0,001	-
Hamilton	1 sd 3	1.9	10 sd 30	21	0.1	9	-	-	-	-	-	-
US/NRC e)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Black & Niehaus	0,26 sd 0,29	0,43 sd 1,04	533 sd 660 hr	458 sd 555 hr	0,051	353 hr f)	0,0015	0,0023 sd 0,0045	5,3 hr	0,0023 sd 0,0045	4,5 hr	4,5 hr
Kisaran	0,055 sd 3,75	0,3 sd 1,9	0,33 sd 236	1,17 sd 21	0,03 sd 0,34	1,1 sd 17	0 sd 0,011	0,001 sd 0,01	0,045 sd 1,6	0,001 sd 0,01	0,001 sd 0,08	0,001 sd 0,08

* A.V. Cohen dan D.K. Pritchard, "Comparative Risks of Electricity Production System: A Critical Review of Literature" (1981)

a) Tidak terdapat studi yang memperkirakan risiko terhadap publik akibat dari transportasi minyak ke pembangkit.

b) jumlah rata-rata hari hilang per cedera diberikan dalam kurung (...) apabila diketahui.

c) kosong bukan berarti tidak berisiko, namun belum ada studi yang memperkirakannya.

d) Faktor beban 75%

e) kecelakaan Level-crossing, kondisi Amerika

f) Kematian dan kecelakaan publik akibat minyak diperkirakan 1% dari tingkat pekerja.

Tabel 8. Perkiraan Dampak Kesehatan Terhadap Pekerja Dari Operasi Pembangkit Kelas 1000-Mwe Dengan Faktor Kapasitas 75%

	Batubara		Minyak		Nuklir (termasuk proses ulang)		
	Kematian (Keceelakaan)	Cedera a)	Keceelakaan Kerja	Cedera a)	Kematian (Keceelakaan)	Cedera a)	Kanker (Kasus / Kematian)
HSC	0,15	- b)	-	-	0,11	-	-
Inhaber (REV-1 dan REV-3)	0,0098 sd 0,068	1,2 sd 6,4 (93)	0,0098 sd 0,038	0,68 sd 1,5 (55)	0,01 sd 0,013	1,37 (50)	0,081
Norwegia	0,01	4	0,01	3,6	0,01 sd 0,2	0,7 sd 2,8	-
Swedia	0,05	4	0,03	4	0,03	11,1	0,14 sd 0,21 c)
WASH 1224	0,03	1,2 (142)	0,037	1,5 (85)	0,012	1,42 (37)	-
Comar & Sagan d)	0,01 sd 0,03	0,9 sd 1,5	0,01 sd 0,037	0,6 sd 1,5	0,01	1,3	0,024
Fagnani & Maccia	0,017	2,9	0,017	4,3	0,013	4,9	0,09
Hamilton	0,12	3,8	-	-	0,015	1,3	0,08
Hamilton	0,01	1,2	0,01	1,2	0,01	1,3	-
Black & Niehaus e)	0,012	160 hr	0,0098	98 hr	0,011	105 hr	0,098 sd 0,135
Kisaran	0,01 sd 0,15	0,9 sd 6,4	0,01 sd 0,038	0,6 sd 4,3	0,01 sd 0,2	0,7 sd 11,1	0,024 sd 0,21

* A.V. Cohen dan D.K. Pritchard, "Comparative Risks of Electricity Production System: A Critical Review of Literature" (1981)

- a) Jumlah hari hilang rata-rata diberikan dalam kurung jika diketahui
- b) Kosong tidak berarti tidak ada risiko, namun belum diperkirakan atau perkiraan tidak dapat dibagi dalam tahapan
- c) termasuk akibat genetik yang menyertainya
- d) faktor beban sebesar atau mendekati 75 %
- e) Dampak nuklir tidak termasuk reprocessing. Jumlah kanker termasuk dampak genetik yang menyertainya