

Studi Komparasi Pembangkit Listrik Berbagai Sumber Energi dan Desain *High Temperature Gas Reactor* (HTGR) untuk Wilayah Terpencil

Nining Yuningsih^{1,a)} dan Dwi Irwanto^{2,b)}

¹Program Studi Fisika

²Laboratorium Fisika Nuklir,

Kelompok Keilmuan Fisika Nuklir dan Biofisika,

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,

Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

^{a)} ning.1924@gmail.com

^{b)} dirwanto@fi.itb.ac.id (corresponding author)

Abstrak

Saat ini Indonesia masih memiliki masalah untuk mencapai rasio elektrifikasi sebesar 100%. Salah satunya adalah akses listrik dan biaya pokok penyediaan (BPP) pembangkit yang masih tinggi. Sumber energi yang banyak membuat pembangkit listrik lebih bervariasi, namun memiliki kelebihan dan kekurangan terutama dari sisi biaya dan keramahan terhadap lingkungan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mencari pembangkit listrik yang kompetitif dan ramah lingkungan untuk daerah terpencil di Indonesia. Analisis komparasi pembangkit listrik berbagai sumber energi dilakukan dengan menggunakan *Desalination Economic Evaluation Program* (DEEP). Dari Analisa yang dilakukan pada beberapa aspek, didapatkan bahwa energi nuklir lebih kompetitif dibandingkan dengan pembangkit listrik lainnya. Selain itu analisis perhitungan desain reaktor menggunakan SRAC dapat menghasilkan desain pembangkit listrik dengan waktu operasi lebih dari 5 tahun dan cocok untuk diterapkan di wilayah terpencil seperti Wamena dan Kepulauan Mentawai.

Kata-kata kunci: Pembangkit Listrik, DEEP, Kepulauan Mentawai, Wamena

PENDAHULUAN

Indonesia memiliki target untuk mencapai rasio elektrifikasi sebesar 100%. Namun saat ini ada beberapa daerah tertentu terutama daerah terpencil yang masih memiliki rasio elektrifikasi rendah. Contohnya adalah wilayah Papua yang baru mencapai rasio elektrifikasi 62,10% [1]. Di sisi lain, beberapa wilayah terpencil masih memiliki Biaya Pokok Penyediaan (BPP) pembangkit yang sangat tinggi. Contohnya adalah Wamena, kepulauan Mentawai, dan beberapa daerah lain yang mencapai harga Rp. 3041. Sementara wilayah besar seperti Jawa dan Bali mampu dicapai dengan biaya dibawah Rp. 1000 [2]. Saat ini, solusi yang diterapkan untuk menanggulangi permasalahan diatas adalah dibangunnya beberapa pembangkit listrik seperti Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), pengembangan sel surya dan lainnya [3]. Hanya saja upaya tersebut masih menghasilkan daya listrik dalam skala kecil sehingga belum mampu memenuhi kebutuhan listrik secara luas dan banyak. Di sisi lain, secara global penggunaan pembangkit listrik tenaga nuklir mengalami peningkatan di kawasan Asia, beberapa wilayah Eropa Timur dan Rusia. Hal ini akan terus berlanjut untuk beberapa tahun ke depan. Pada tahun 2017 total kapasitas bersih listrik yang dihasilkan dari tenaga nuklir yang beroperasi adalah 394 GWe. Angka ini naik dari 391 GWe pada tahun 2016 [4].

Banyaknya sumber daya alam yang dapat digunakan sebagai sumber energi listrik membuat jenis pembangkit listrik lebih bervariasi. Namun setiap sumber energi yang digunakan memiliki tantangan tersendiri seperti masalah biaya dan keramahan lingkungan. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan jenis pembangkit listrik berdasarkan sumber energi, menentukan jenis pembangkit listrik yang kompetitif dan ramah

lingkungan, dan menganalisis desain pembangkit untuk memenuhi kebutuhan listrik di wilayah terpencil yang masih memiliki BPP tinggi seperti Kepulauan Mentawai dan wilayah-wilayah di Papua.

METODE

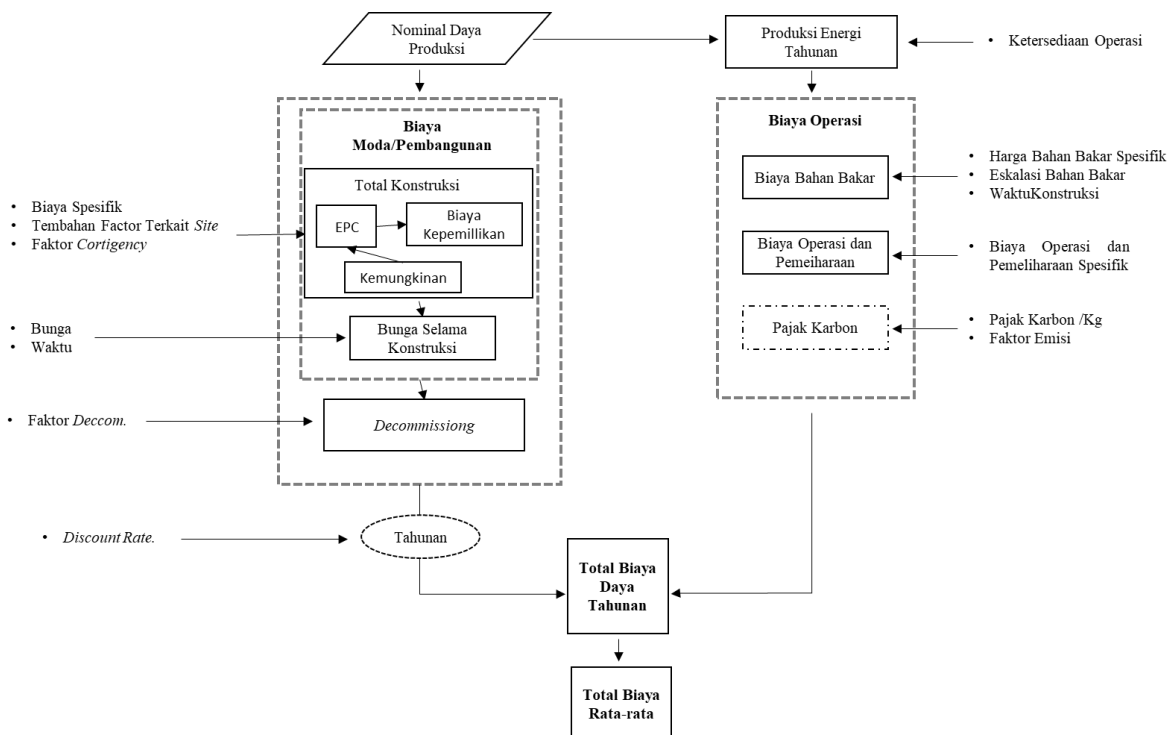
Metode Studi Komparasi Pembangkit Listrik

Metode yang digunakan untuk menghasilkan komparasi pembangkit listrik adalah *Desalination Economic Evaluation Program (DEEP)*. *Spreadsheet* yang awalnya dikembangkan untuk *International Atomic Energy Agency (IAEA)* oleh *General Atomics* dan kemudian diperluas cakupannya oleh IAEA [5]. Terdapat formulasi pembangkit listrik dengan beberapa sumber energi seperti terangkum pada tabel 1.

Tabel 1. Formulasi Pembangkit Listrik yang Terdapat dalam DEEP [5]

	Sumber energi	Daya	Panas
NSC	Nuklir – Turbin Uap (PWR,PWHR,SPWR)	√	√
NBC	Nuklir – Turbin Gas (GTMHR)	√	√
NH	Nuklir – Panas (HR)		√
Batu Bara	Siklus Uap – Batu Bara (SSB)	√	√
Minyak	Siklus Uap – Minyak	√	√
GT	Gas Turbin /HRSG	√	√
CC	Siklus Kombinasi (Uap Turbine – Gas Turbine)	√	√
FH	Siklus Kombinasi (Boiler)		√

Selain formulasi pembangkit listrik, DEEP juga menghitung besaran biaya pembangunan, biaya operasi (pemeliharaan dan bahan bakar) dan biaya daya untuk tiap kilowatt hour (kWh). Alur perhitungan dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Model Rincian Biaya Pembangkit Listrik pada DEEP

Parameter yang digunakan dalam DEEP untuk setiap jenis pembangkit pada penelitian ini ditunjukkan oleh tabel 2.

Tabel 2. Parameter yang Digunakan dalam DEEP

Parameter		Nilai
Referensi Daya Termal		15 MWt 60 MWt
Site Specific Cooling Water Temperature		25°C
Referensi Efisiensi Bersih (%)		
Nuklir	Siklus Uap	33
	Siklus Gas	42
	Siklus Kombinasi	53
	Hanya Panas	90
Minyak/Gas	Siklus Uap	40
	Siklus Gas	35
	Siklus Kombinasi	53
	Hanya Panas	90
Batu Bara	Siklus Panas	39
	Hanya Panas	90

Metode Desain High Temperatur Gas Reactor (HTGR)

Program komputer yang digunakan untuk melakukan perhitungan desain reaktor pada penelitian ini adalah *Standard Thermal Reactor Analysis Code* (SRAC) dengan kode versi 2006. Sedangkan *library* data nuklir menggunakan *Japanese Evaluated Nuclear Data Library* (JENDL) 4.0 [6].

Dalam penelitian ini, reaktor didesain berdasarkan desain *High Temperature Test Reactor* (HTTR)-Jepang dengan melakukan beberapa modifikasi. Hal ini dilakukan berdasarkan kebutuhan daya pada tempat terpencil yang masih memiliki BPP tinggi dan rasio elektrifikasi yang masih rendah. Dua diantaranya adalah Kepulauan Mentawai yang berada di bagian barat Indonesia dan daerah Wamena di bagian timur Indonesia. Modifikasi pertama dilakukan pada level daya reaktor yakni 15 MWt dan 60 MWt. Besarnya daya ini berdasarkan pada kebutuhan daerah Wamena dan Mentawai [7,8]. Modifikasi kedua adalah dari pengayaan bahan bakar Uranium untuk desain dengan daya 60 MWt. Tabel 3 menunjukkan parameter-parameter yang digunakan dalam desain, sedangkan tabel 4 dan tabel 5 merupakan konfigurasi bahan bakar yang digunakan, dengan mengacu pada konfigurasi HTTR. Terdapat dua tipe racun dapat bakar yaitu H-I yang mengandung 2,22 wt.% boron alami dan H-II mengandung 2.74 wt.% dari bahan [9].

Tabel 3. Parameter Desain Utama yang Digunakan dalam SRAC

Parameter Desain	Satuan	Nilai
Daya Termal	MWt	150
Temperatur Pendingin Outlet	°C	850/950
Temperatur Pendingin Inlet	°C	395
Tekanan Pendingan Primer	MPa	4
Struktur Inti	-	Grafit
Diameter Inti Ekuivalen	m	2,30
Tinggi Inti Efektif	m	2,90
Pengayaan Bahan Bakar Uranium	wt %	3,40 -9,90 dan 13,75-17,00
Material Pendingin	-	Gas Helium
Arah Aliran	-	Ke bawah
Nomor Blok Bahan Bakar	-	150
Nomor Kolom Bahan Bakar	-	30
Jumlah pasangan batang kenda (dalam inti / reflektor)	-	7/9

Tabel 4. Konfigurasi Bahan Bakar dalam Inti HTTR dengan Pengayaan Bahan Bakar 13,73% - 17,00%

Nomor Lapisan Aksial	Item	Nomor Zona Bahan Bakar			
		1	2	3	4
3	Pengayaan Uranium (%)	16,00	16,50	16,75	17,00
	Nomor Batang Bahan Bakar	33	33	31	31
	Tipe Racun Dapat Bakar	H-I	H-I	H-I	H-I
4	Pengayaan Uranium (%)	15,25	15,75	16,25	16,50
	Nomor Batang Bahan Bakar	33	33	31	31
	Tipe Racun Dapat Bakar	H-II	H-II	H-II	H-II
5	Pengayaan Uranium (%)	14,75	15,25	15,50	15,75
	Nomor Batang Bahan Bakar	33	33	31	31
	Tipe Racun Dapat Bakar	H-II	H-II	H-II	H-II
6	Pengayaan Uranium (%)	13,75	14,00	14,25	14,50
	Nomor Batang Bahan Bakar	33	33	31	31
	Tipe Racun Dapat Bakar	H-I	H-I	H-I	H-I
7	Pengayaan Uranium (%)	13,75	14,00	14,25	14,50
	Nomor Batang Bahan Bakar	33	33	31	31
	Tipe Racun Dapat Bakar	H-I	H-I	H-I	H-I

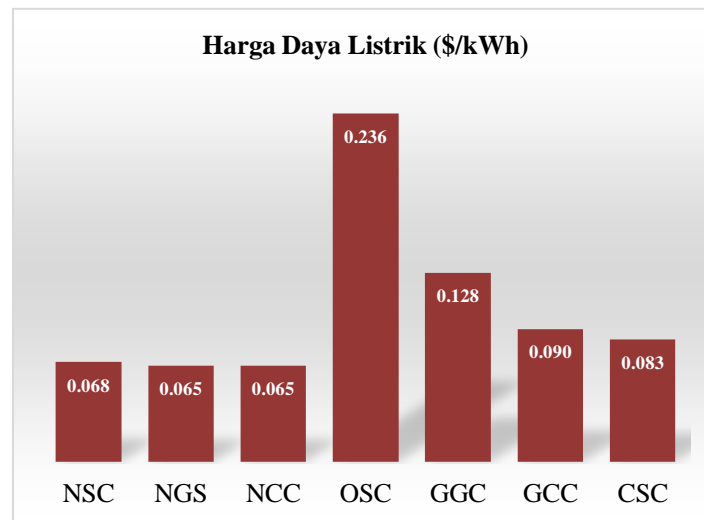
Tabel 5. Konfigurasi Bahan Bakar dalam Inti HTTR

Nomor Lapisan Aksial	Item	Nomor Zona Bahan Bakar			
		1	2	3	4
3	Pengayaan Uranium (%)	6,70	7,90	9,40	9,90
	Nomor Batang Bahan Bakar	33	33	31	31
	Tipe Racun Dapat Bakar	H-I	H-I	H-I	H-I
4	Pengayaan Uranium (%)	5,20	6,30	7,20	7,90
	Nomor Batang Bahan Bakar	33	33	31	31
	Tipe Racun Dapat Bakar	H-II	H-II	H-II	H-II
5	Pengayaan Uranium (%)	4,30	5,20	5,90	6,30
	Nomor Batang Bahan Bakar	33	33	31	31
	Tipe Racun Dapat Bakar	H-II	H-II	H-II	H-II
6	Pengayaan Uranium (%)	3,40	3,90	4,30	4,60
	Nomor Batang Bahan Bakar	33	33	31	31
	Tipe Racun Dapat Bakar	H-I	H-I	H-I	H-I
7	Pengayaan Uranium (%)	3,40	3,90	4,30	4,60
	Nomor Batang Bahan Bakar	33	33	31	31
	Tipe Racun Dapat Bakar	H-I	H-I	H-I	H-I

HASIL DAN DISKUSI

Data perbandingan pembangkit listrik hasil perhitungan diberikan pada gambar 2. Terlihat bahwa biaya daya listrik tiap kWh bervariasi untuk setiap jenis pembangkit. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) memiliki harga yang paling rendah dibandingkan dengan tipe pembangkit listrik lainnya. Hal ini terjadi karena beberapa

faktor, diantaranya adalah biaya bahan bakar dan perkiraan biaya pembangkit yang rendah dibandingkan dengan sumber energi minyak atau gas dan batu bara [10,11].

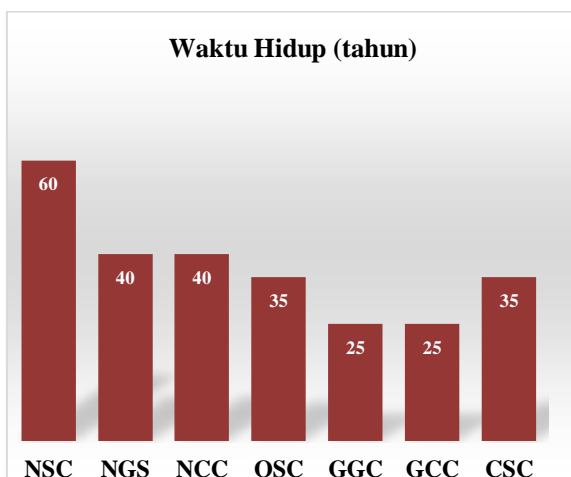


Gambar 2. Perbandingan Harga Listrik Menggunakan DEEP

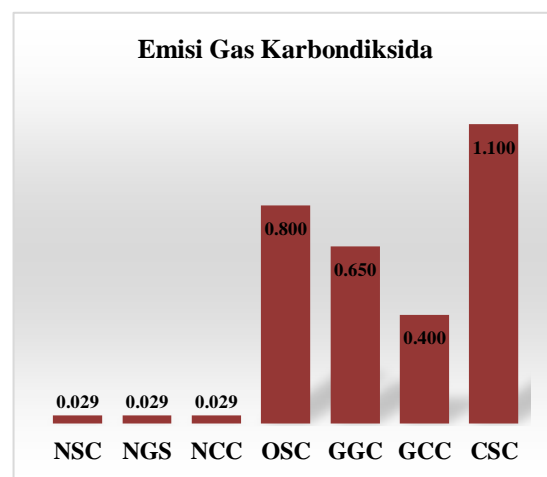
Gambar 2 memberikan informasi bahwa pembangkit listrik menggunakan tenaga nuklir dengan siklus gas, biaya yang harus digunakan adalah Rp. 922,28 (1 USD = Rp. 14.189) untuk 1 kWh. Biaya ini sangat jauh berbeda jika dibandingkan dengan besaran BPP dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia (KESDM) untuk daerah kepulauan Mentawai, Wamena maupun daerah terpencil lainnya yakni BPP nya mencapai Rp. 3.041 [2]. Selanjutnya pembangkit listrik tenaga nuklir dengan siklus uap memiliki harga Rp. 950,66, batu bara Rp. 117,69, gas menggunakan siklus kombinasi (gas-uap) Rp. 1277,01, gas menggunakan siklus gas Rp. 1816,19 dan yang paling tinggi adalah minyak atau gas menggunakan siklus uap Rp. 3348,60. Terdapat perbedaan harga maupun daya yang dihasilkan seperti tercantum pada tabel 6 antara siklus uap dan siklus gas. Hal ini terjadi karena dalam prosesnya siklus uap membuang panas yang berlebih dibandingkan siklus gas [12].

Tabel 6. Referensi Daya yang Dihasilkan dan Produksi Listrik Tiap Jenis Pembangkit Listrik

Tipe Pembangkit Listrik	Referensi Daya Yang Dihasilkan (MWe)		Produksi Listrik <i>Site Specific</i> (GWh/Tahun)	
	15 MWt	60 MWt	15 MWt	60 MWt
Nuklir - Siklus Uap (NSC)	4,80	19,20	31	122
Nuklir - Siklus Gas (NGC)	6,30	25,20	39	157
Nuklir - Siklus Kombinasi (NCC)	8,25	33,00	56	222
Minyak - Siklus Uap (OSC)	6,00	24,00	29	117
Gas - Siklus Gas (GGC)	5,10	20,40	37	148
Gas - Siklus Kombinasi (GCC)	7,98	31,95	53	211
Batubara- Siklus Uap (CSC)	5,85	23,40	29	117



(a)

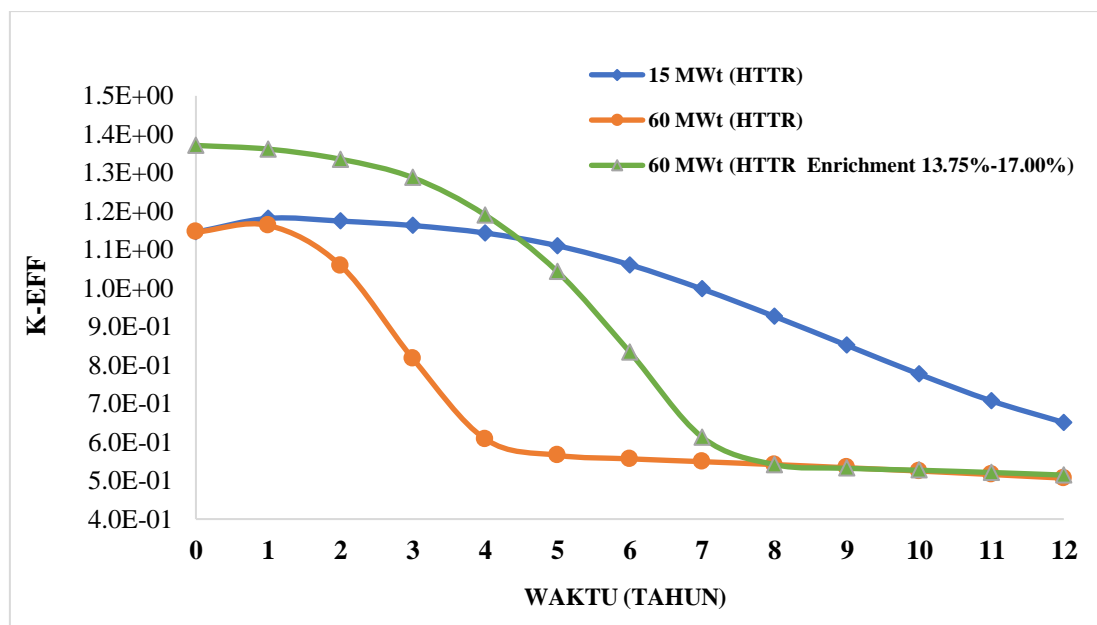


(b)

Gambar 3. (a) Waktu Hidup Tiap Jenis Pembangkit Listrik (b) Emisi yang Dihasilkan oleh Tiap Pembangkit Listrik

Gambar 3 (a) menunjukkan bahwa waktu hidup tiap pembangkit berbeda-beda. Pembangkit dengan tenaga nuklir memiliki waktu hidup yang paling lama. Hal ini juga dilaporkan juga dalam [10,11] yang menunjukkan bahwa rata-rata reaktor nuklir memiliki waktu hidup 40 sampai 60 tahun. Kondisi ini menjadikan pembangkit listrik tenaga nuklir memiliki biaya pemeliharaan yang lebih tinggi dibandingkan dengan pembangkit lainnya, tetapi memiliki biaya pembangkitan yang lebih rendah.

Gambar 3 (b) menunjukkan bahwa emisi gas karbondioksida yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga nuklir lebih sedikit yaitu 0,029. Dilaporkan juga bahwa intensifitas karbon nuklir lebih kecil dibandingkan dengan batu bara [13]. Hal ini menjadikan pembangkit listrik tenaga nuklir lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan pembangkit listrik menggunakan energi dari minyak, gas ataupun batu bara [10,11]. Salah satu faktor penyebabnya karena selama penambangan bahan bakar (uranium), proses pemasokan, konstruksi pembangkit hingga pengayaan tidak banyak melepaskan gas sisa [14].



Gambar 4. Desain HTGR Berdasarkan HTTR dengan daya 15 MWt dan Daya 60 MWt

Gambar 4 menggambarkan bahwa desain HTGR berbasis HTTR dengan daya 15 MWt (termasuk besaran pengayaan bahan bakar) pada penelitian ini memiliki masa hidup 6 tahun. Hal itu terlihat dari nilai faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) diatas 1,0 yang menunjukkan tingkat kekritisan reaktor. Sedangkan untuk daya 60 MWt mampu beroperasi selama 2 tahun.

Modifikasi HTTR dengan mengubah pengayaan bahan bakar dilakukan karena desain ini ditujukan untuk diterapkan di daerah terpencil sehingga diperlukan masa operasi selama mungkin atau dengan kata lain dibuat supaya proses pengisian isi ulang bahan bakar dapat dilakukan sejarang mungkin. Untuk tujuan tersebut, dibuat modifikasi pengayaan pada desain daya 60 MWt sebesar 13,75% hingga 17,00% yang mampu hidup sampai usia 5 tahun. Desain ini diharapkan mampu memenuhi kebutuhan listrik di daerah Wamena dan Kepulauan Mentawai.

KESIMPULAN

Hasil perhitungan menggunakan DEEP memberikan data bahwa pembangkit listrik dengan sumber energi nuklir memiliki harga daya listrik yang paling rendah per kWh yakni sebesar Rp. 922,28. Sedangkan pembangkit lainnya memiliki harga yang lebih besar dari Rp. 1000. Selain itu, pembangkit listrik tenaga nuklir memiliki waktu hidup yang lebih lama yakni 40 sampai 60 tahun. Emisi gas yang dihasilkan oleh pembangkit listrik menggunakan energi nuklir jauh lebih rendah yakni 0,029 dibandingkan dengan batubara.

Desain reaktor yang dimodifikasi dari HTTR juga memberikan efektifitas dari sisi masa operasi reaktor untuk daya 15 MWt yakni mampu beroperasi selama 6 tahun. Sedangkan untuk daya 60 MWt, masa operasinya mencapai 2 tahun. Selanjutnya, desain dengan daya 60 MWt dimodifikasi kembali dari sisi pengayaan material fissile menjadi sebesar 13,75% hingga 17,00 %, sehingga desain reaktor ini mampu beroperasi hingga 5 tahun.

Modifikasi desain pada penelitian ini disesuaikan untuk dapat dibangun di daerah terpencil seperti Wamena dan Kepulauan Mentawai.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Program Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi (PUPT) RISTEKDIKTI.

REFERENSI

1. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, *Rencana Aksi Percepatan Pembangunan Papua dan Papua Barat Kementerian ESDM*, Bekasi, Indonesia (2018)
2. Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral, *Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Tentang Besaran Biaya Pokok Penyediaan Pembangkitan PT Pembangkit Listrik Negara*, KESDM, Jakarta (2019)
3. Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, *Statistik Ketenagalistrikan 2017*, KESDM, Indonesia (2018)
4. World Nuclear Association, *World Nuclear Performance Report*, London, United Kingdom (2018)
5. General Atomic, *DEEP 5 User Manual*. International Atomic Energy Agency (2013)
6. K. Okumura, T. Kugo, K. Kaneko, dan K. Tsuchihashi, *SRAC2006: A Comprehensive Neutronics Calculation Code System*, Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) (2007)
7. Badan Pusat Statistik, *Kecamatan Wamena Dalam Angka*, BPS Kabupaten Jayawijaya, Papua (2018)
8. Badan Pusat Statistik, *Kabupaten Kepulauan Mentawai Dalam Angka*, BPS Kepulauan Mentawai, Sumatera Barat (2018)
9. T. K. Kim, T. A. Taiwo, and Frank Szakaly, *Evaluation of the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) Start-up Experiments*, Nuclear Engineering Division, Argonne (2005)
10. R. Tarjanne, A. Kivistö, *Comparison of Electricity Generation Costs*, laporan Penelitian EN A-56, Finlandia (2008)
11. K. C. Kavvadias, I. Khamis, *Sensitivity analysis and probabilistic assessment of seawater desalination costs fueled by nuclear and fossil fuel*, Energ Policy (2014)
12. EUTurbines, *Gas and Steam Turbines Solutions for a sustainable energy mix*, Kantor Brussels, Belgia
13. A. Ntahniel, M. Augustin, M. Marc, *Comparative Life-cycle Assessment of Non-fossil Electricity Generation Technologies: China 2030 Scenario Analysis*, Project Report, Civil Systems and the Environment (2010)
14. B. Svensson, & S. Husebye, *Environmental and Health Impacts of Electricity Generation: A comparison of the Environmental Impacts of Hydropower with those of other generation technologies*. The International Energy Agency - Implementing Agreement for Hydropower Technologies and Programmes (2002)