SENIATI 2022
ISSN 2085-4218
ITN Malang, 13 Juli 2022

Perencanaan Pembangkit Beban Dasar Menggunakan Briket dengan Mempertimbangkan Aspek Ekonomi dan Keandalan Sistem untuk Mencapai Net Zero Emission

Mario Dwi Prasetyo [1)], Aulia Amjad Lutfi [2)], Bagas Aryo Dananjoyo [3)]

[1),2),3)]Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Jl. Teknik Kimia, Keputih, Sukolilo, Surabaya
Email : dwimario874@gmail.com

Abstrak. *Pemanfaatan briket untuk pembangkit listrik dapat menjadi alternatif masalah eneri baru terbarukan yang intermittent karena biaya yang murah, ramah lingkungan dan ketersediannya terbesar ketiga di dunia setelah batu bara dan minyak. Secara teknis, energi briket bisa digunakan sebagai bahan bakar pembangkit beban dasar seperti PLTU sekaligus solusi bagi perubahan iklim karena berpotensi penetral CO2. Di Indonesia, 40% limbah biomassa masih belum dikelola dengan baik sehingga berpeluang diterapkan sebagai sumber energi primer pembangkit. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan pembangkit PLTU dengan pembangkit tenaga briket dari sudut pandang ekonomi perencanaan dan keandalan sistem. Perhitungan ekonomi perencanaan pembangkit digunakan parameter LCOE pada PLTU, pembangkit briket 25%, 50%, 75%, dan 100%. Sementara itu, keandalan sistem pembangkit diuji menggunakan LOLE dan LOEE pada pembangkit 50% dan 100% briket dengan mempertimbangkan capacity outage generator. Pembangkit briket 100% secara ekonomis layak digunakan sebagai pembangkit beban dasar karena karakteristik kurva antara capacity factor (CF) dan biaya pembangkitan menunjukkan kecenderungan lebih mahal bila dioperasikan dengan nilai CF rendah dan ekonomis apabila beroperasi pada kapasitas besar. Keandalan pembangkitan briket 100% dan briket 50% sama-sama melebihi standar LOLE yaitu 1 hari/tahun di tahun 2030. Nilai LOEE mengikuti LOLE karena saat pemadaman yang lebih lama energi yang tidak tersalurkan menjadi lebih besar.*

Katakunci: *Briket, LCOE, LOEE, LOLE, Pembangkit Beban Dasar*

1. Pendahuluan

Tantangan terbesar negara-negara di seluruh dunia dalam pengembangan pembangkit energi listrik ini adalah dekarbonisasi untuk memitigasi pemanasan global. Komitmen ini bermula saat *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) di tahun 2018 merilis laporan khusus yang menunjukkan dunia membutuhkan peranan untuk mencapai *net-zero emission* di tahun 2050 dengan menekan global warming hingga 1,5^{o}C sesuai dengan Persetujuan Paris [1]. Untuk mewujudkan *net-zero emission*, langkah bisa diambil adalah mengganti energi fosil menjadi *renewable energy* di sektor listrik, transportasi, serta pendinginan dan pemanas. Pada tahun 2020, 145 negara telah menerapkan kebijakan energi baru terbarukan dan yang diarahkan pada sektor listrik, 65 negara yang telah menetapkan insentif dan mandat peraturan di sektor transportasi, dan hanya 22 negara di sektor pemanas dan pendingin. Namun demikian, sebagian besar negara-negara ini belum mencapai target mereka [2].

Di tahun 2020 kapasitas energi baru terbarukan di sektor listrik yang sudah diinstalasi sebesar 2.838,8 GW dengan geotermal 14,1 GW, hidropower 1.171 GW, bio-power 145 GW, energi gelombang laut 0,527 GW, *concentrating solar power* 6,2 GW, energi angin 743 GW, dan energi matahari 760GW [2]. Dari data di atas menunjukkan bahwa energi air, angin dan matahari menjadi sumber energi baru terbarukan yang sudah banyak digunakan. Namun, energi tersebut merupakan sumber energi yang ketersediaan energi primernya *intermittent* atau bergantung pada cuaca. Hanya negara-negara tertentu saja yang memiliki potensi untuk dikembangkan pembangkit jenis ini secara konsisten. Untuk mendapatkan daya maksimum secara kontinyu, maka sistem harus terhubung pada baterai yang memiliki harga mahal dan kapasitas besar [3]. Pertimbangan lain adalah, prinsip pembangkit harus selalu menyuplai energi sesuai dengan permintaan beban. Tantangan yang besar dari pembangkit intermittent ini adalah bagaimana antisipasi apabila terjadi lonjakan permintaan beban di saat pembangkitan yang terjadi sangat kecil [4]. Terlebih, saat ini konsep transformasi energi global menjadi 100% energi terbarukan telah menjadi kampanye oleh banyak organisasi di dunia [5].

SENIATI 2022
ISSN 2085-4218
ITN Malang, 13 Juli 2022

Pemanfaatan limbah pertanian dan agroindustri sebagai bahan bakar biomassa untuk pembangkit listrik seperti briket dapat menjadi alternatif pemecahan masalah pembangkit terbarukan yang *intermittent*. Biomassa merupakan sumber energi domestik yang secara alami berlimpah dan menyajikan peluang energi terbarukan menjanjikan sebagai alternatif untuk pengganti sumber daya fosil [6]. Selain itu, biomassa menjadi sumber energi primer yang murah, ramah lingkungan dan terbesar ketiga di dunia setelah batu bara dan minyak sehingga ideal digunakan sebagai sumber energi subtitusi [7]. Secara teknis briket bisa digunakan sebagai bahan bakar pembangkit *based load* seperti pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Penggunaan biobriket memiliki pertimbangan lain untuk diterapkan sebagai solusi perubahan iklim karena memiliki potensi menjadi penetral CO_2 *(zero emission)* [6]. Alasan briket bisa menetralkan CO_2 kembali karena bisa dilakukan secara kontinyu dengan penanaman pohon kembali [8]. Sementara itu, berdasarkan penerapan briket tongkol jagung di China hanya menghasilkan emisi 1 kg CO_2, e/GJ lebih rendah dari batubara sebesar 157 kg CO_2, e/GJ [9].

Pada kasus bioenergi, penggunaan limbah pertanian dan industri seperti sekam padi, sabut kelapa, jerami gandum, ampas tebu, serbuk gergaji, dan sisa hutan lainnya banyak digunakan sebagai sumber energi alternatif untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil [10]. Sedangkan di Indonesia, kegiatan pertanian menyisakan banyak sampah yang belum termanfaatkan dengan baik. Menurut Badan Pusat Statistik Indonesia, hanya 40% dari limbah ini yang dikelola dengan baik, sisanya dibuang melalui pembakaran terbuka dan pembuangan. Di daerah pedesaan negara berkembang, limbah jenis ini kadang-kadang digunakan sebagai biomassa untuk kompor [11]. Sabut kelapa, sekam padi, ataupun serbuk gergaji adalah limbah hayati yang dapat diubah menjadi bahan bakar rumah tangga serta industri yang ramah lingkungan seperti briket [10]. Serta, industri kayu di Indonesia adalah salah satu yang terbesar di dunia dan telah didukung berdasarkan letak geografis Indonesia dan kondisi iklim daerah tersebut yang menjadikan potensi serbuk gergaji menjadi lebih menjanjikan untuk dimanfaatkan [12].

Sejauh ini, PLN telah melaksanakan ujicoba *co-firing* pada 26 PLTU dengan porsi biomassa sebesar 1 - 5% [13]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan pembangkit PLTU dengan pembangkit listrik berbahan bakar briket dari sudut pandang ekonomi perencanaan pembangkit dan keandalan sistemnya. Dari analisis yang dilakukan akan diperoleh tingkat kelayakan implementasi pembangkit berbahan bakar briket sebagai pengganti batu bara dengan persentase *co-firing* bervariasi.

2. Hasil dan Pembahasan

2.1. Pembebanan Pembangkit

Prinsip dasar penyaluran daya pada optimasi sistem tenaga listrik adalah jumlah supply atau energi yang dibangkitkan harus sama dengan jumlah permintaan beban. Namun, jumlah permintaan beban selalu berubah-ubah sepanjang waktu yang digambarkan dalam kurva beban harian. Sistem pembangkit harus bisa menyesuaikan jumlah energi yang dibangkitkan sesuai dengan kondisi beban. Untuk menyeimbangkan *supply* dan *demand* pembangkit maka terdapat tiga pembagian pembangkit menurut pembebanannya [14].

2.1.1. *Based Load Power Plant*

Waktu operasi rata – rata 5000 jam pertahun (*capacity factor* >57%) dan memiliki daya keluaran yang besar. Pembangkit ini memiliki biaya kapital tinggi, tetapi biaya operasinya rendah. Secara teknis pembangkit ini biasanya membutuhkan waktu dan biaya *starting* yang tinggi. Contoh pembangkit beban dasar adalah PLTU batubara dan PLTPB.

2.1.2. *Intermediate Load Power Plant*

Waktu operasi rata-rata 2000-5000 jam pertahun (23% < *capacity factor* < 57%). PLTGU dan pembangkit tua yang kurang efisien digunakan sebagai pemikul beban menengah.

2.1.3. *Peak Load Power Plant*

Dioperasikan untuk memenuhi beban saat mencapai maksimum. Karena periode beban puncak tidak selalu sama, sehingga pembangkit ini hanya beroperasi rata-rata <2000 jam pertahun (*capacity factor* <

SENIATI 2022
ISSN 2085-4218
ITN Malang, 13 Juli 2022

23%). Karena mode operasi ini hanya dilakukan saat beban puncak maka pembangkit mode ini sangat cepat untuk melakukan *starting*. Pembangkit yang dipilih biasanya yang memiliki kapital rendah tetapi biaya operasinya tinggi seperti pembangkit PLTG dan PLTD. Namun, ada juga pembangkit tenaga air yang digunakan untuk memikul beban puncak, yaitu PLTA tipe *storage* dan *pump storage*.

2.2. Briket

Briket merupakan salah satu sumber energi berkelanjutan, ramah lingkungan, sehat dan tidak bergantung pada bahan bakar fosil yang dapat dihasilkan dari sumber limbah biomassa domestik, pertanian dan industri. Di Indonesia, faktor residual mencapai 30,5% untuk hutan alam dan 16,4% untuk hutan industri di Kalimantan, Papua, dan Sumatra. Hal tersebut menunjukkan bahwa setiap 1 m^3 kayu bulat menghasilkan 0,351 m^3dan 0,153 m^3 residu dari kayu alam dan hutan industri serta untuk kayu manufaktur (yaitu kayu lapis, kayu serbuk gergaji dan veneer) mencapai 0,6 m^3 [15]. Berdasarkan studi, pertanian dan hutan memproduksi limbah residu masing-masing sekitar 155,27 dan 7,85 juta ton massa kering per tahun serta potensi energi tahunan dari pertanian, hutan, dan limbah residu pengolahan kayu yang dihasilkan bisa mencapai 2822,29 MW, 98,34 MW, dan 18,58 MW teknologi pembakaran unggun terfluidisasi dan turbin pembangkit (C/GT) dan 4181,17 MW, 145,69 MW, dan 27,50 MW siklus gabungan gas dan uap (C/GC) teknologi, masing-masing. Itu bisa mencakup sekitar 28% dan 39% dari pasokan listrik Indonesia pada tahun 2019 (sekitar 10565,92 GW) [16].

Dalam menganalisis efisiensi briket dari berbagai limbah pertanian dan kehutanan digunakan berbagai parameter sebagai alat ukur seperti *volatile matter, ash content, moisture content, fixed carbon, sulfur content*, dan *heating value*. *Volatile matter* adalah ukuran banyak zat yang hilang apabila sampel briket dipanaskan pada suhu dan waktu yang ditentukan. *Ash coal* merupakan ukuran persentase zat organik yang tertinggal setelah sampel batubara dibakar dalam kondisi standar sampai diperoleh berat yang tetap. *Moisture content* merupakan ukuran kadar air pada briket dan *fixed carbon* merupakan banyaknya karbon yang terdapat pada briket.

Tabel 1. Perbandingan *Heating Value* [17]

Analisis Terdekat dan *Heating Value*	Briket Serbuk Gergaji	Batu Bara
Volatile Matter	71,03	28,7
Ash content	2,58	12,10
Moisture content	5,67	2,73
Fixed carbon	20,72	56,47
Sulfur content	0,03	0,67
Heating value (MJ/kg)	20,25	27,84

Dari Tabel 1 menunjukkan bahwa heatrate briket dari serbuk gergaji bernilai 20.25 MJ/Kg sedangkan batu bara bernilai 27.84 MJ/Kg [17]. Sedangkan *calorific value* yang dapat dihasilkan oleh briket serbuk gergaji mencapai 4451.37 kcal/kg yang kalua dikonversi yaitu sekitar 18,623 MJ/Kg [18]. Hal ini masih mendekati nilai heatrate batubara sehingga berpotensi dikembangkan sebagai bahan bakar pembangkit listrik di Indonesia.

2.3. Biaya Pembangkitan

Untuk membandingkan biaya pembangkitan dalam sebuah perencanaan pembangkit digunakan parameter LCOE (*Levelized Cost of Electricity*) [19]. Perhitungan biaya pembangkitan ini meliputi *capital costs, fixed and variable operation & maintenance (FO&M) costs, dan fuel costs (FC)* [20]. LCOE yang dihitung dan diskusikan di bagian ini didefinisikan dari perspektif ekonomi dan tidak termasuk transfer atau subsidi apapun.

$$ACC = ACC + VOMC + FC + FOMC \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

Dimana, ACC (*Annualized Capital Cost*), VOMC (*Variable Operation and Maintenance)*, FC (*Fuel Cost*), dan FOMC (*Fixed Operation and Maintenance*). Semua biaya tersebut diekspresikan dalam bentuk energi ($/MWh). ACC dan FOMC dihitung menggunakan persamaan berikut.

SENIATI 2022
ISSN 2085-4218
ITN Malang, 13 Juli 2022

$$ACC = \frac{OC*CRF*1000}{CAF*24*365} \quad \text{(2)}$$

$$FOMC = \frac{FXC*1000}{CAF*24*365} \quad \text{(3)}$$

Dimana, OC (*Overnight Cost)*, FXC (*Annual Fixed Cost*), CRF (*Capacity Recovery Factor)*, dan CAF *(Capacity Availability Factor)* [19].

Sementara itu, harga bahan bakar dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$FC = \left(\frac{FP}{HC}\right) * HR \quad \text{(4)}$$

2.4. Keandalan Sistem Pembangkit

Keandalan sistem pembangkitan adalah faktor yang paling penting dalam perencanaan jangka panjang untuk ekspansi kapasitas kelistrikan di masa depan untuk memastikan bahwa total kapasitas terpasang cukup untuk memenuhi permintaan beban [21]. Keandalan sistem pembangkit bisa direpresentasikan kedalam bentuk *Loss of Load Expectation* (LOLE) dan *Loss of Energy Expectation* (LOEE). LOLE adalah metode analisa keandalan untuk menentukan cadangan yang diperlukan dalam sistem tenaga, untuk menilai keandalan statis sistem tenaga, serta untuk mengevaluasi durasi waktu yang ketika beban tidak disuplai dengan kapasitas daya yang dibutuhkan sehingga mengakibatkan pemadaman [22].

$$LOLE = \sum_{k=1}^{K} p(k).t_{loss}(k) \quad \text{(4)}$$

Dimana

k	: indeks *state probability*
K	: jumlah *state*
P(k)	: *probability state*-k
T_{loss} (k)	: durasi kehilangan beban

Setiap pemadaman pembangkit dengan kapasitas yang melebihi cadangan mengakibatkan pengurangan energi yang disupply ke beban [23]. Indeks *Loss of Energy Expectation* (LOEE) digunakan untuk mengukur ketersediaan sistem, merupakan energi yang diharapkan tidak dipasok oleh sistem pembangkit karena beban melebihi kapasitas pembangkit yang tersedia [24].

$$LOEE = \sum_{n=1}^{k} E_k P_k \quad \text{(6)}$$

Keterangan :

Ek	: Energi yang tidak terlayani
Pk	: Probabilitas komulatif

2.5. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan dua aspek analisis yaitu dari sudut pandang ekonomi perencanaan pembangkit dan keandalan sistem pembangkit.

2.6. Analisis Ekonomi

Sistem pembangkit yang dijadikan rujukan untuk analisis ekonomi digunakan PLTU Paiton Unit 9 dengan kapasitas 660MW dan telah mencoba menggunakan *co-firing*. Oleh karena itu, pembangkit ini relevan jika diasumsikan untuk digantikan bahan-bakarnya dari batu bara menjadi biomassa briket. Variasi briket yang digunakan dilakukan menggunakan persentase 25%, 50% dan 75%, dan 100%.

Detail data mengenai biaya dan karakteristik pembangkitan dapat dilihat pada Tabel 2.

SENIATI 2022
ISSN 2085-4218
ITN Malang, 13 Juli 2022

Tabel 2. Tabel Biaya Pembangkit [25]

Data	Satuan	Batu Bara	Biomassa	Gas
Kapasitas	MW	660	660	660
Overnight construction factor	$/kW	2772	4018	1383
Capacity Factor	%	85	70	100
Lifetime	Tahun	35	30	20
Biaya bahan bakar	$/GJ	3,5	1	12
Heat rate	MJ/kWh	12,3	13	8,5
Fixed O&M Costs	% of OC	2	2,9	3,34
Variable O&M	% of OC	5,42	5,5	3,25

2.7. Analisis Keandalan Sistem

Pembangkit ini akan digunakan untuk men-*supply* beban sesuai dengan profil beban tahunan Jawa-Bali pada Tabel 3. Profil beban ini digunakan sebagai acuan untuk simulasi keandalan sistem pada pembangkit yang akan direncanakan. Pembangkit yang digunakan sebagai rujukan dalam analisis keandalan sistem ini selain menggunakan dua perbandingan yaitu percobaan keandalan menggunakan 100% briket dan percobaan 50% briket-50% batu bara. Kapasitas pembangkit yang digunakan pada penelitian ini menggunakan acuan Pembangkit Paiton sebagaimana yang tertera pada Tabel 4.

Tabel 3. Beban Puncak yang Mampu Di-S*upply* Sistem Jawa Bali [26]

Tahun	Kapasitas Pembangkit (MW)	Beban Maksimal (MW)
2015	33.420	29.650
2016	35.190	31.200
2017	38.090	33.750
2018	43.210	38.700
2019	56.350	49.250
2020	58.530	49.300
2021	60.850	51.500
2022	63.180	53.500
2023	66.740	57.050
2024	69.740	60.100

Tabel 4. Kapasitas Pembangkit Paiton

Unit Pembangkit Paiton	Kapasitas Pembangkit (MW)
1	400
2	400
3	815
7	615
8	615
9	660
TOTAL	3505

Mengacu pada Tabel 3 dapat diperoleh kapasitas dan beban pada tahun 2022 sampai dengan 2032 dengan menggunakan regresi linier sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5. Dari data tersebut terlihat bahwa dari tahun 2022 sampai dengan 2024 terjadi kenaikan beban tanpa adanya penambahan kapasitas pembangkit dan akan dilihat pengaruhnya terhadap keandalan sistem pembangkit dari sudut pandang LOLE dan LOEE. Dalam penelitian ini digunakan bahwa nilai beban dasar besarnya setengah dari beban puncaknya.

SENIATI 2022
ISSN 2085-4218
ITN Malang, 13 Juli 2022

Tabel 5. Data Beban Puncak dan Pembangkitan yang Digunakan Dalam Penelitian

Tahun	Kapasitas Pembangkit (MW)	Beban Maksimal (MW)
2022	3505	2150
2023	3505	2265
2024	3505	2362
2025	3505	2471
2026	3505	2577
2027	3505	2683
2028	3505	2789
2029	3505	2859
2030	3505	3001
3031	3505	3107
2032	3505	3213

Standar *FOR (Force Outage Rate)* atau probabilitas pembangkit yang keluar sistem pada interkoneksi Jawa-Bali. Nilai FOR yang digunakan untuk referensi PLTU adalah 0,1275% [27]. Sementara itu, nilai FOR untuk pembangkit briket sebesar 1% [28].

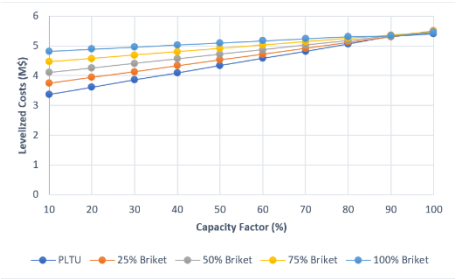
2.8. Hasil Analisis Ekonomi

Biaya pembangkitan pada Tabel 2 setelah dikalkulasi diperoleh data biaya perencanaan pembangkit sebagaimana Tabel 6 berikut.

Tabel 6. Data Biaya Perencanaan Pembangkit

Kombinasi Pembangkit	*Capital Cost* (M$)	*FO&M (J$/tahun)*	*VO&M (J$/tahun)*	FC (*M$/ tahun*)	*Income (M$/tahun)*	LCOE ($/kWh)
100% batu bara	1,8295	36,59	99,16	0,211	0,491	0,03
Briket 25%	2,0351	46,67	113,41	0,167	0,469	0,0317
Briket 50%	2,2407	56,75	125,95	0,126	0,448	0,033
Briket 75%	2,4463	66,83	136,76	0,087	0,426	0,0348
Briket 100%	2,6519	76,91	145,85	0,053	0,405	0,037

Dari kelima pembangkit di atas dibandingkan berdasarkan LCOE dan *capacity factor* untuk menopang permintaan beban tahunan.



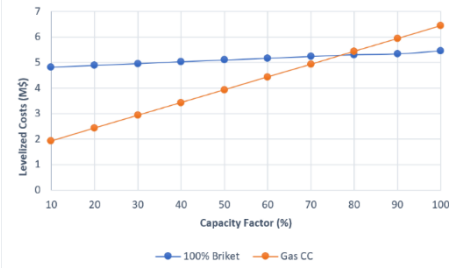
Gambar 1. Kurva perbandingan *Capacity Factor* dengan *Levelized Costs Pembangkit*

Dari Gambar 1 bisa dianalisis bahwa semakin banyak komposisi briket yang digunakan dalam sistem pembangkit menyebabkan semakin kurang ekonomis. Namun, tingkat biaya pembangkitan masih terbilang murah yaitu sebesar 0,037 $/kWh. Dari Gambar 1 Juga dapat dianalisis bahwa semakin kecil *capacity factor* biaya pembangkitan semakin mahal. Sementara itu, semakin besar *capacity factor* kecenderungan grafik semakin melandai yang artinya biaya pembangkitan semakin murah. Terbukti, terdapat titik potong pada *capacity factor* di sekitar 90%. Keadaan ini mencirikan bahwa jenis pembangkit ini sangat cocok digunakan untuk pembangkit beban dasar atau *based load*, karena untuk mendapatkan keadaan yang paling optimal pembangkit harus dioperasikan pada kapasitas yang besar sepanjang tahun dengan biaya operasional yang murah [14]. Untuk menguatkan analisis ini, maka

SENIATI 2022
ISSN 2085-4218
ITN Malang, 13 Juli 2022

pembangkit 100% briket dibandingkan dengan pembangkit *peak load* seperti PLTG dengan data biaya pembangkitan pada Tabel 2.

Hasil perbandingan yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 2, terlihat bahwa pembangkit tenaga gas memiliki harga yang lebih murah saat beroperasi dengan kapasitas yang lebih kecil. Semakin besar *capacity factor* biaya operasionalnya semakin mahal terlihat dari bentuk grafik yang naik secara signifikan. Dari gambar tersebut juga bisa dianalisis bahwa pembangkit menggunakan briket 100% ekonomis dioperasikan untuk nilai *capacity factor* 70-80%. Sementara gas *combined cycle* lebih optimal dioperasikan dengan *capacity factor* kurang dari 70-80%.



Gambar 2. Biaya Briket 100% dan PLTG

2.9. Hasil Analisis Keandalan Sistem

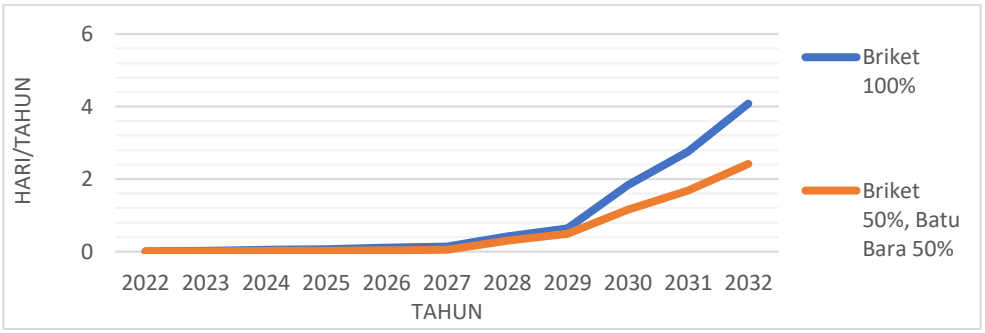
Hasil perhitungan *Load of Load Probability (LOLE)* pada kedua variasi 100% briket dan 50% briket dan 50% batu bara dengan perubahan beban antara tahun 2022 hingga 2032. Tabel 8 merupakan hasil dari analisis LOLE sistem pembangkit pada penelitian ini.

Tabel 7. LOLE Variasi 100% Pembangkit Briket

Tahun	Beban (MW)	Nilai LOLE (%)		Hari/Tahun	
		Briket 100%	Briket 50%	Briket 100%	Briket 50%
2022	2150	0,0032	0,001	0,0117	0,00368
2023	2265	0,00675	0,002278	0,0246	0,0083
2024	2362	0,0124	0,004	0,045	0,015
2025	2471	0,019	0,006275	0,07	0,0229
2026	2577	0,029	0,009	0,106	0,033
2027	2683	0,0387	0,012	0,141	0,043
2028	2789	0,1157	0,084	0,422	0,306
2029	2859	0,1759	0,1329	0,642	0,485
2030	3001	0,5	0,316	1,83	1,1534
2031	3107	0,7569	0,459	2,762	1,6774
2032	3213	1,118	0,6648	4,08	2,4266

Berdasarkan Tabel 7 dapat dilihat bahwa semakin besar beban semakin besar pula nilai persentase LOLE dan kejadian pemadaman setiap tahunnya. Hal ini dikarenakan semakin besar beban maka cadangan energi pembangkit *(spinning reserve)* semakin berkurang hingga tidak ada *back up* energi saat terjadi pembangkit lepas dari sistem. Untuk standar LOLE PLN ditetapkan sebesar 0,024% atau 1 hari/tahun. Dari Tabel 7 juga dapat dilihat bahwa nilai LOLE melebihi batas standar PLN saat tahun 2030 dengan besar pemadaman untuk variasi pembangkit 100% briket 1,83 hari/tahun dan 1,1534 hari/tahun untuk variasi 50% pembangkit batu bara dan 50% briket. Apabila dianalisis lebih jauh, di tahun 2030 total beban sebesar 3001 MW dengan kapasitas pembangkit 3505 MW. Artinya, di tahun tersebut *spinning reserve* pembangkit hanya sebesar 504MW. Keadaan ini menyebabkan sistem keandalannya berkurang karena sistem tidak akan mampu menyuplai beban apabila terdapat pembangkit yang lepas dari sistem yang melebihi kapasitas *spinning reserve*-nya. Untuk standar *spinning reserve* sendiri, di Pembangkit Jawa-Bali sebesar 30% dari beban puncak atau dalam teori optimasi minimal sebesar kapasitas terbesar pembangkit yang sedang beroperasi.

SENIATI 2022
ISSN 2085-4218
ITN Malang, 13 Juli 2022



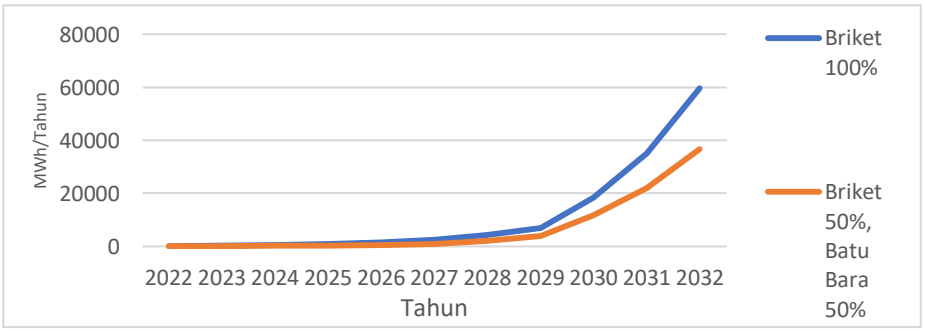
Gambar 3. Perbandingan LOLE Pengujian Briket 100% dan Briket 50% dan Batu Bara 50%

Perbandingan antara percobaan keandalan sistem pembangkit 100% briket dan 50% batu bara dan 50% briket ditunjukkan oleh Gambar 3. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa keandalan sistem pada pembangkit 100% briket lebih rendah secara persentase apabila dibandingkan dengan pembangkit 50% briket dan 50% batu bara. Namun, perbedaan LOLE ini tidak signifikan karena baik pembangkit 100% briket dengan 50% briket dan 50% batu bara sama-sama melebihi standar di tahun 2030 dengan selisih 0,184%.

Sementara itu, berdasarkan Tabel 8 dapat diketahui bahwa setiap tahun besarnya LOEE bertambah besar yang juga menyebabkan energi yang tidak tersalurkan semakin besar. Hal ini berkaitan erat dengan besarnya nilai LOLE yang menggambarkan durasi pemadaman setiap tahunnya. Semakin besar LOLE semakin besar pula nilai LOEE dan semakin besar pula energi yang tidak tersalurkan ke konsumen per tahun.

Tabel 8. LOEE Variasi 100% Pembangkit Briket

Tahun	Beban (MW)	LOEE (%%)		*Loss Energy* (MWh/Tahun)	
		Briket 100%	Briket 50%	Briket 100%	Briket 50%
2022	2150	0,0417	0,0085	78,57	16,023
2023	2265	0,0108	0,032	214,719	63,64
2024	2362	0,213	0,067	441,24	138,82
2025	2471	0,2985	0,1286	862,594	278,418
2026	2577	0,6567	0,2108	1482,49	476,031
2027	2683	1	0,3175	2352,365	746,2
2028	2789	1,772	0,8119	4329,6723	1983,6
2029	2859	2,719	1,558	6811,425	3902,41
2030	3001	7	4,43	18411,633	11646,35
2031	3107	12,877	8,0398	35047,923	21882,21
2032	3213	21,196	13	59660,11	36610,25



Gambar 4. Perbandingan LOEE Pengujian Briket 100% dengan Briket 50% dan Batu Bara 50%

Dari Gambar 5 juga dapat diketahui perbandingan LOEE antara Briket 100% dan Briket 50% dan Batu Bara 50% bahwa energi yang tidak tersalurkan pada pembangkit briket 100% lebih besar daripada briket

SENIATI 2022
ISSN 2085-4218
ITN Malang, 13 Juli 2022

50% dan batu bara 50%. Hal ini terjadi karena lama pemadaman yang terjadi saat kapasitas pembangkit tidak mampu melakukan *back up* ketika terjadi pembangkit yang lepas dari sistem.

3. Simpulan

Berdasarkan analisis ekonomi dan keandalan sistem yang dilakukan pada penelitian ini maka bisa ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Nilai LCOE pembangkit 100% briket lebih besar daripada pembangkit PLTU, briket 25%, 50%, dan 75%. Namun, selisih antara pembangkit PLTU dengan 100% briket tidak signifikan yaitu 0,007$/kWh dengan biaya setiap kWh-nya sebesar 0,037$/kWh atau 537,19 IDR/kWh.
2. Pembangkit 100% briket secara ekonomis layak digunakan sebagai pembangkit based load dengan ditunjukkan karakteristik kurva antara *capacity factor* dan biaya pembangkitan briket 100% yang menunjukkan kecenderungan lebih mahal saat dioperasikan dengan nilai CF yang rendah. Seiring bertambahnya CF, kurva bergerak melandai yang menggambarkan lebih efisien dan ekonomis ketika dioperasikan dalam kapasitas yang besar.
3. Keandalan sistem pembangkit 100% briket cenderung memiliki keandalan yang lebih rendah dibandingkan dengan pembangkit batu bara ditunjukkan dengan nilai FOR dan LCOE yang lebih rendah. Namun ketika diimplementasikan pada sistem, pembangkit 100% briket dan pembangkit 50% briket dan 50% batu bara sama-sama melampaui standar pemadaman 1 hari/tahun di tahun 2030.
4. Nilai LOEE besarnya mengikuti LCOE karena ketika LCOE nilainya bertambah besar juga menyebabkan energi yang tidak tersalurkan semakin besar. Sehingga untuk meningkatkan keandalan sistem bisa dilakukan dengan menambah *spinning reserve* pembangkit dan melakukan pemeliharaan pembangkit untuk memperbaiki nilai FOR pembangkit.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih, Peneliti sampaikan kepada Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Listrik Teknik Elektro ITS, segenap dosen, dan asisten laboratorium yang telah banyak membantu dan menyukseskan penelitian ini.

Daftar Pustaka

[1]. K. Handayani, P. Anugrah, F. Goembira, I. Overland, B. Suryadi, and A. Swandaru, "Moving beyond the NDCs: ASEAN pathways to a net-zero emissions power sector in 2050," *Appl. Energy*, vol. 311, no. February, p. 118580, 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.118580.
[2]. IPCC, *Climate Change 2021 The Physical Science Basis Summary for Policymakers Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2021.
[3]. M. H. M. Hariri, M. K. Mat Desa, S. Masri, and M. A. A. M. Zainuri, "Grid-connected PV generation system-components and challenges: A review," *Energies*, vol. 13, no. 17, 2020, doi: 10.3390/en13174279.
[4]. D. Huang *et al.*, "A mixed integer optimization method with double penalties for the complete consumption of renewable energy in distributed energy systems," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 52, no. PA, p. 102061, 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102061.
[5]. D. S. Renné, "Progress, opportunities and challenges of achieving net-zero emissions and 100% renewables," *Sol. Compass*, vol. 1, p. 100007, 2022, doi: 10.1016/j.solcom.2022.100007.
[6]. C. H. A. I. Raju, K. Prem, K. Sunil, K. Srikanth Bhimareddy, and C. Ramya, "Studies on densification and conversion of wastes as fuel briquettes for power generation," *Mater. Today Proc.*, vol. 44, pp. 1090–1107, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.184.
[7]. A. K. Tripathi, P. V. R. Iyer, and T. C. Kandpa, "Tripathytec1998.Pdf." pp. 479–488.
[8]. M. Njenga *et al.*, "Additional cooking fuel supply and reduced global warming potential from recycling charcoal dust into charcoal briquette in Kenya," *J. Clean. Prod.*, vol. 81, pp. 81–88, 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.06.002.
[9]. J. Hu *et al.*, "Economic, environmental and social assessment of briquette fuel from agricultural residues in China - A study on flat die briquetting using corn stalk," *Energy*, vol. 64, pp. 557–566, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2013.10.028.
[10]. G. A. Akolgo, E. A. Awafo, E. O. Essandoh, P. A. Owusu, F. Uba, and K. A. Adu-Poku, "Assessment of

the potential of charred briquettes of sawdust, rice and coconut husks: Using water boiling and user acceptability tests," *Sci. African*, vol. 12, p. e00789, 2021, doi: 10.1016/j.sciaf.2021.e00789.

[11]. R. M. Sari, F. G. Torres, O. P. Troncoso, G. E. De-la-Torre, and S. Gea, "Analysis and availability of lignocellulosic wastes: Assessments for Indonesia and Peru," *Environ. Qual. Manag.*, vol. 30, no. 4, pp. 71–82, 2021, doi: 10.1002/tqem.21737.

[12]. I. S. S. Adi, H. Muharam, and F. Adrian, "An analysis of the Indonesian wooden based industry," *Iioabj J.*, vol. 8, no. 3, pp. 79–82, 2017.

[13]. Kementerian ESDM, "Rencana Co-Firing pada PLTU," pp. 12–13, 2021, [Online]. Available: https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-rencana-co-firing-pada-pltu.pdf.

[14]. F. Lutfi, "Study of Power Generation Planning in South and Central Kalimantan System for Kalimantan Master Plan Until 2050," 2019, [Online]. Available: https://repository.its.ac.id/60516/.

[15]. B. C. H. Simangunsong *et al.*, "Potential forest biomass resource as feedstock for bioenergy and its economic value in Indonesia," *For. Policy Econ.*, vol. 81, no. May 2016, pp. 10–17, 2017, doi: 10.1016/j.forpol.2017.03.022.

[16]. E. I. Rhofita, R. Rachmat, M. Meyer, and L. Montastruc, "Mapping analysis of biomass residue valorization as the future green energy generation in Indonesia," *J. Clean. Prod.*, vol. 354, no. March, p. 131667, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131667.

[17]. D. P. Biswas, "Physicochemical Property and Heating Value Analyses of Charcoal Briquettes from Agricultural Wastes: An Alternative Renewable Energy Source," *Int. Conf. Comput. Commun. Chem. Mater. Electron. Eng. IC4ME2 2018*, 2018, doi: 10.1109/IC4ME2.2018.8465639.

[18]. K. B. Deepak and N. A. Jnanesh, "An experimental study of various characteristics of biomass briquettes made from areca leaves- an alternative source of energy," *IET Conf. Publ.*, vol. 2013, no. 648 CP, 2013, doi: 10.1049/cp.2013.2527.

[19]. G. R. Timilsina, G. Cornelis van Kooten, and P. A. Narbel, "Global wind power development: Economics and policies," *Energy Policy*, vol. 61, no. 2013, pp. 642–652, 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2013.06.062.

[20]. J. Thomas, F. S. George, and D. Ph, "The Levelized Cost of Electricity from Existing Generation Resources Table of Contents," no. June, 2019.

[21]. M. J. A. Husain Saleh, S. A. Abbas Hasan Abdulla, A. M. A. Aziz Altaweel, and I. S. Qamber, "LOLP and LOLE calculation for smart cities power plants," *2019 Int. Conf. Innov. Intell. Informatics, Comput. Technol. 3ICT 2019*, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/3ICT.2019.8910296.

[22]. M. Čepin, "Evaluation of the power system reliability if a nuclear power plant is replaced with wind power plants," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 185, no. January, pp. 455–464, 2019, doi: 10.1016/j.ress.2019.01.010.

[23]. M. Čepin, *Assessment of Power System Reliability: Methods and Applications*. 2011.

[24]. R. R. Dharmawan, "Analisis Indeks Keandalan PLTGU Blok 1 PT. PJB UP Gresik Menggunakan Teorima Bayes dan Decomposisi LU," *J. Tek. Elektro*, vol. 9, no. 3, pp. 658–665, 2020.

[25]. G. R. Timilsina, "Are renewable energy technologies cost competitive for electricity generation?," *Renew. Energy*, vol. 180, pp. 658–672, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.08.088.

[26]. A. N. Widiastuti, S. Sarjiya, K. A. Pinanditho, and E. T. Prastyo, "Evaluasi Keandalan Perencanaan Pembangkit Wilayah Jawa-Bali dengan Mempertimbangkan Ketidakpastian Peramalan Beban," *J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Inf.*, vol. 6, no. 2, pp. 230–234, 2017, doi: 10.22146/jnteti.v6i2.320.

[27]. E. Keandalan *et al.*, "Timur Dengan Menggunakan Metoda Cumulant."

[28]. DEN, "Technology Data for the Indonesian Power Sector," no. December, pp. 1–140, 2017, [Online].