

Evaluasi Keekonomian Pemanfaatan *Residue* Hutan Produksi Untuk Pemenuhan Energi di Ibu Kota Negara

Economic Evaluation of the Use of Production Forest Residues to Fulfill Energy in the National Capital City

Erwan Hermawan^{1*}, Adiarso Adiarso¹, R. Agung Wijono¹, Usman Sudjadi², Hari Setiawan¹

¹Research Center for Process and Manufacturing Industry Technology – National Research and Innovation Agency, Serpong, Indonesia 15311

²Research Center for Nuclear Fuel and Radioactive Waste Recycling Technology, National Research and Innovation Agency, Serpong, Indonesia 15311

*Email korespondensi: erwanhermawan29@gmail.com

Article Info

Submitted: August 12, 2023

Accepted: February 18, 2024

Keywords:

Industrial forest plantation, biomass power plant, techno-economic

Abstract

The National Capital City (IKN) expansion plan necessitates a 382 GWh electricity supply by 2024, which will be sourced exclusively from renewable energy sources. Recognising the inherent possibilities within IKN, one viable avenue for exploration is the utilisation of PLTBm. The objective of this study is to ascertain the economic worth of biomass power plant by utilising wood pellet fuel and forest residue. In addition, we also examined the possibility of obtaining fuel from the Production Forest region in East Kalimantan. This study employs techno-economic analyses incorporating economic indicators such as the internal rate of return (IRR), net present value (NPV), and payback period. Location mapping of IKN was conducted to have a comprehensive understanding of the available land area for raw materials and the proximity to IKN's supply sources. Based on the findings of this study, production forests spanning a total land area of 221,689 hectares. The economic price of wood pellets from the calculation is Rp. 1,380/kg. According to economic calculations, the minimal price for electricity is IDR 3,000/kwh. Conversely, when utilising forest residue, the electricity price cannot be lower than IDR 2,000/kwh. Essentially, both of these power rates remain higher than the standard energy prices, therefore providing the opportunity to generate steam. Utilising wood pellet fuel for steam production results in an economic steam price of Rp. 700/kg. However, by utilising forest residue at a cost of Rp. 493/kg, the economic steam price significantly decreases to Rp. 470/kg.

Doi: <https://doi.org/10.19028/jtep.012.1.35-56>

1. Pendahuluan

Krisis yang terjadi di Pulau Jawa, terutama permasalahan lingkungan menjadi tujuan utama pemindahan Ibu Kota Negara (IKN). Jumlah penduduk yang tinggi merupakan penyebab berkurangnya kualitas lingkungan seperti penurunan muka air tanah 7.5-10 cm/tahun terutama di wilayah Jakarta dan wilayah sekitarnya memiliki penduduk mencapai 40.4 juta jiwa (Bappenas,2021).

Luas wilayah IKN secara keseluruhan adalah 256,142.7 Ha, dimana 75% kawasan IKN akan direncanakan menjadi ruang terbuka hijau. Konsep hutan tanaman energi cocok untuk diterapkan dalam pemenuhan energi di IKN. Saat ini di Kalimantan Timur 1,3 juta hektar Hutan Tanaman Industri yang mencakup 375 izin usaha (Toumbourou et al., 2022). Indonesia berencana membuat ibukota negara baru di Kalimantan Timur. Rencananya ibu kota baru ini membutuhkan suplai listrik sebesar 382 GWh di tahun 2024 yang akan disuplai dari green energy (PLN, 2021). Salah satu kelemahan dari pemanfaatan *renewable energy* adalah bergantung terhadap alam atau *inconsistent* dan *unpredictable nature of renewable power production*. Seperti pembangkit solar dan angin yang sifatnya *intermittent*. Untuk energi biomassa memiliki sifat yang *less intermittent*, ketersediaan biomass bergantung pada sustainability dari feedstock (Lilienthal et al., 2004; Ross & Bindra, 2021).

Saat ini penggunaan biomassa sebagai bahan baku untuk pembangkit telah diterapkan di Indonesia. Program yang dilakukan pemerintah adalah *biomass-cofiring* yang akan diterapkan pada 52 lokasi di 113 unit Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) milik PT. Perusahaan Listrik Negara (PLN) (Kementerian ESDM, 2023). Berdasarkan (PLN, 2020) di Indonesia hanya memiliki 2 unit Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBm) dan beberapa proyek yang dikembangkan oleh swasta baru akan dibangun di tahun 2023. Permasalahan penggunaan PLTBm adalah pada keberlanjutan suplai bahan baku. Akibat tidak memperoleh bahan baku yang berkelanjutan dan harga bahan baku yang mahal menyebabkan PLTBm tidak dapat beroperasi secara ekonomis. Diperlukan upaya yang dapat menjaga suplai bahan baku dan harga yang terjangkau sehingga keekonomian dari PLTBm menjadi lebih menarik.

Dengan melihat potensi ini pemanfaatan produk samping hutan tanaman industri untuk menghasilkan produk biomassa di Ibu Kota Negara dapat menjadi opsi dalam mensuplai *green energy* di wilayah tersebut. Luas Hutan Produksi di Kalimantan Timur adalah sekitar 6 juta Ha, sehingga terdapat potensi residu hasil hutan sebesar 22.9 juta ton (Dinas Kehutanan Provinsi Kalimantan Timur, 2023). Ini merupakan potensi yang menarik untuk dikembangkan. Beberapa penelitian telah mengkaji mengenai konsep hutan tanaman energi bahwa dari hasil hutan tanaman dapat digunakan untuk menghasilkan listrik untuk menggerakkan mesin kecil, pompa irigasi, pengelolaan makanan di area terpencil, dll. Melihat potensi dan peluang ini perlu dilakukan penelitian mengenai potensi bahan baku residu hasil hutan dan keekonomian apabila menggunakan opsi penggunaan *wood pellet* atau residu hasil yang langsung digunakan untuk produksi listrik maupun *steam* (Ewing & Msangi, 2009; Maltsoğlu et al., 2015).

2. Metode Penelitian

Penentuan biaya investasi menggunakan beberapa benchmark dari literatur untuk menentukan besaran biaya investasi. Persamaan yang digunakan adalah menggunakan *sixteenth rules* berdasarkan (Branan, 2002; Turton et al., 2012):

$$\frac{C_a}{C} = \left(\frac{A_a}{A_b} \right)^n \quad (1)$$

Keterangan: A = Equipment cost, C = Purchased cost, n = Cost exponent.

Pada Tabel 1 merupakan parameter untuk biaya tetap yang digunakan seperti O&M dan depresiasi untuk masing-masing pabrik. Biaya O&M *biomass pellet plant* dan *power plant* masing-masing adalah 4% dan 2% (IRENA, 2019; Xu et al., 2020). Studi ini melakukan *financial modelling* dengan parameter keekonomian *internal rate of return* (IRR), *net present value* (NPV), dan *payback period* sebagai tolak ukur keekonomian proyek. IRR merupakan *annual rate of return* atau *discount rate* yang menjadikan NPV sama dengan nol, sehingga persamaan yang digunakan untuk menghitung IRR adalah persamaan 2 (Khan et al., 2023; Li et al., 2023; Vazquez-Sanchez et al., 2023).

$$0 = NPV = \sum_{i=0}^n \frac{R_{i,total} - C_{i,total}}{(1 + IRR)^i} \quad (2)$$

dimana $R_{i, total}$ merupakan revenue pada tahun i , $C_{i, total}$ adalah total biaya pada tahun i . Payback Period (PP) dihitung dengan menggunakan persamaan 3.

$$PP = \frac{Total\ investment}{Net\ profit} \quad (3)$$

NPV dihitung untuk mengukur feasibility dari proyek. Ketika NPV positif maka proyek memiliki nilai keekonomian yang baik, sebaliknya apabila nilai NPV negatif maka proyek tidak cukup ekonomis untuk dikembangkan (Vazquez-Sanchez et al., 2023). C_i merupakan *net cash flow* pada tahun ke i , nilai ini merupakan selisih antara in cash flow dan out cash flow, r merupakan discount rate, N total lifetime operasional pabrik, dan n merupakan tahun saat ini.

$$NPV = -Total\ investment + \sum_{n=1}^N \frac{C_i}{(1+r)^n} \quad (4)$$

Untuk mengetahui harga listrik keekonomian dari pembangkit listrik digunakan persamaan *levelized cost of electricity* (LCOE) dari pembangkit listrik tenaga surya yang direpresentasikan pada persamaan 4, dimana total biaya dibagi dengan total produksi listrik net (W_{net}) (Cormos et al., 2023).

$$LCOE = \frac{\text{Annualized total investment} + \text{Total fixed \& variable cost}}{W_{net}} \quad (5)$$

Tabel 1 merupakan asumsi biaya tetap yang digunakan dalam perhitungan keekonomian untuk pabrik *wood pellet* maupun PLTBm.

Tabel 1. Estimasi biaya tetap

Biaya tetap	Pabrik <i>Woodpellet</i>	Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBm)	Sumber
O&M	2% dari biaya investasi	4% dari biaya investasi	(IRENA, 2019; Xu et al., 2020)
Depresiasi		10%	
Rasio <i>debt to equity</i>		100% equity	

Parameter yang digunakan dalam menghitung keekonomian pabrik *wood pellet* dan pembangkit listrik biomassa ditunjukkan pada Tabel 3. Perhitungan biaya untuk pabrik *wood pellet* memanfaatkan residu dari produksi kayu bulat. Sehingga perhitungan biaya bahan baku hanya memasukkan biaya variabel konsumsi energi, biaya pengumpulan residu, dan biaya transport bahan baku. Pabrik *wood pellet* diasumsikan terintegrasi dengan pabrik kayu bulat, oleh karea itu produk sampingan dari produksi kayu bulat dapat dimanfaatkan tanpa harus membeli. Biaya produksi *woodpellet* terdiri dari beberapa komponen yaitu biaya energi listrik, depresiasi, pengumpulan bahan baku, biaya distribusi bahan baku, dan biaya O&M yang digunakan untuk mengcover biaya maintenance alat, pegawai, dan biaya *general & administration*. Hari operasional adalah 330 hari dengan *capacity factor* pabrik 80%-84%. *Moisture content* pada *wood pellet* adalah 10% setelah dilakukan treatment dari *residue* yang memiliki *moisture content* 50-60% (Roman et al., 2021; Simangunsong et al., 2017). Perhitungan kebutuhan bahan baku menggunakan persamaan 5.

$$\text{Feedstock consumption (ton per hour)} = \frac{\text{boiler capacity (ton per hour)} \times (\text{steam enthalpy} - \text{feedwater enthalpy})}{\text{Boiler efficiency (\%)} \times \text{feedstock calorific value}} \quad (5)$$

Sedangkan produksi listrik dihitung dengan menggunakan persamaan 6.

$$Net\ power = boiler\ efficiency\ (\%) \times turbine\ efficiency\ (\%) \times generator\ efficiency\ (\%) \quad (6)$$

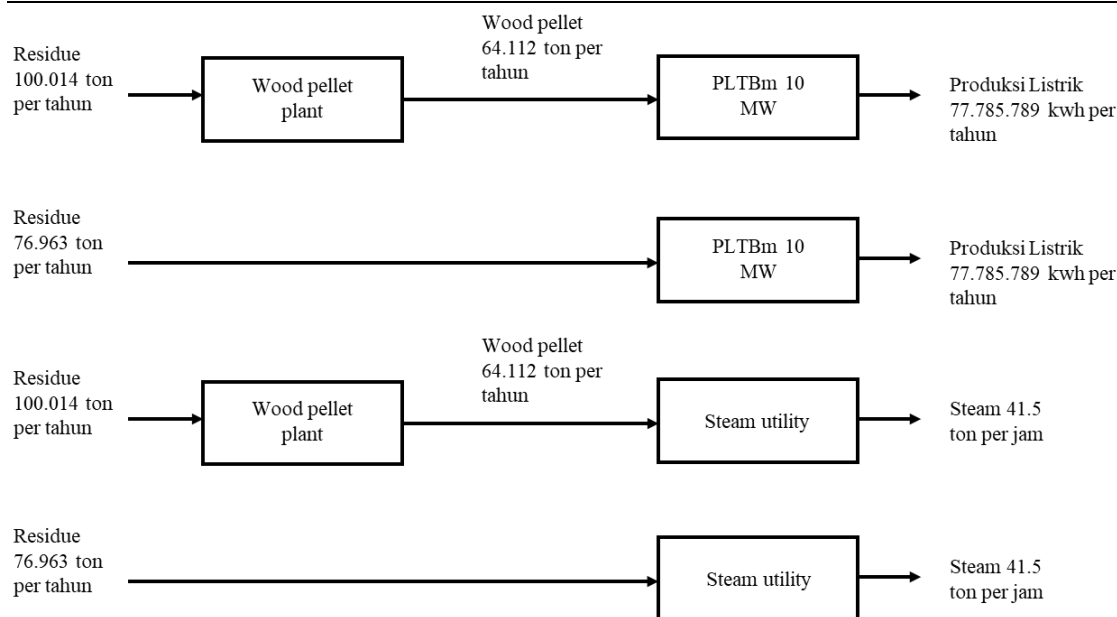
Dimana *steam enthalpy* 691 Kcal/kg, *feedwater enthalphy* 20 Kcal/kg, efisiensi boiler 80%, efisiensi turbin 30%, efisiensi generator 95%, nilai kalori residu kayu 3,582 Kcal/kg, dan nilai kalori wood pellet 4,300 Kcal/kg. Total kebutuhan bahan bakar residu untuk 76.963 ton per tahun dan 64.111 ton untuk pellet.

Tabel 2. Parameter yang digunakan dalam perhitungan keekonomian

Parameter	Unit	Sumber
Pabrik wood pellet		
Luas Hutan Tanaman Industri	29,000 Ha	
Produktivitas kayu log	25/m ³ /ha/tahun	(Indroyono, 2021)
Produksi hasil kayu log	725,000 m ³ /tahun	
Rasio residu	0.153 m ³ residu untuk setiap 1 m ³ hasil hutan dalam bentuk kayu	(Simangunsong et al., 2017)
Produksi residu	105,379 ton/tahun	
Rasio <i>raw material</i> ke <i>wood pellet</i>	1.56 ton <i>raw material</i> per ton <i>wood pellet</i>	(Saosee et al., 2020)
Kapasitas pabrik <i>wood pellet</i>	80,000 ton/tahun	
Produksi <i>wood pellet</i>	67,550 ton/tahun	
Life time pabrik	20 tahun	(Golonis et al., 2022; Nabavi et al., 2020)
Benchmark biaya investasi: Pabrik <i>wood pellet</i> milik Richi Machinery	Total investasi USD 2.7 juta di tahun 2013, sehingga hasil <i>benchmark</i> investasi berdasarkan persamaan 1 adalah	(Casteno, 2010; Richi Machinery, 2013)
Total estimasi biaya investasi pabrik <i>wood pellet</i> kapasitas 80,000 ton/tahun	USD 4.313.220	
Komponen biaya tetap dan variabel:		(IRENA, 2019; Zamora-Cristales & Sessions, 2016; Pantaleo et al., 2020; Towler & Sinnott, 2022)
- Konsumsi energi listrik untuk setiap fasilitas:		
(i) <i>Wood yard</i>	20 kwh/ton	
(ii) <i>Pre-dryer</i>	45 kwh/ton	

Parameter	Unit	Sumber
(iii) <i>Hammer mills</i>	50 kwh/ton	
(iv) <i>Pellet mills</i>	56 kwh/ton	
- Depresiasi	10%	
- Biaya O&M (tenaga kerja, perawatan pabrik, overhaul, dll.)	4% dari biaya investasi (biaya perawatan alat dan biaya <i>general & administration</i>)	
- <i>Residue Collection</i>	USD 22.9/ton	
- <i>Transport wood residue to mill</i>	USD 0.16/km (biaya transportasi dibatasi dengan radius 50 km)	
- <i>Bag 50 kg</i>	Harga per buah IDR 2,670/USD 0,18. Total kebutuhan karung 1.351.010 buah.	
- <i>Insurance</i>	1% dari biaya investasi	
- biaya lain-lain (administrasi, marketing, R&D dll.)	3% dari <i>revenue</i>	
Harga jual <i>wood pellet</i>	Variabel	
Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBm)		
Harga beli <i>wood pellet</i>	Variable	
Kapasitas PLTBm	10 MW	
<i>Moisture content wood pellet</i>	10%	(Roman et al., 2021;
<i>Residue</i>	50-60%	Simangunsong et al., 2017)
Nilai kalori residue	15MJ/kg (3.585 kcal/kg)	(Khorshidi et al., 2014)
Nilai kalori <i>wood pellet</i>	18 MJ/kg (4300 kcal/kg)	(Saracoglu & Gunduz, 2009)
Umu r pembangkit	30 tahun	(NREL, 2021)
Capacity factor	80%	
Potensi pembangkit yang dapat dibangun	10 MW	
Produksi listrik per tahun	69,120,000 kwh	
Kebutuhan energi	10% dari total daya (1MW)	(Kumar et al., 2015)

Parameter	Unit	Sumber
Benchmark biaya investasi	PLTBm Bali dengan biaya investasi USD 30 juta kapasitas 10 MW di tahun 2016	(Kontan, 2016)
Total biaya investasi	USD 36 juta (berdasarkan estimasi dengan menggunakan persamaan 1)	
Harga jual listrik	Variabel	
Minimum IRR	10%	(Takizawa & Okubo, 2019)



Gambar 1. Skema perhitungan dari hulu hingga pemanfaatan di hilir

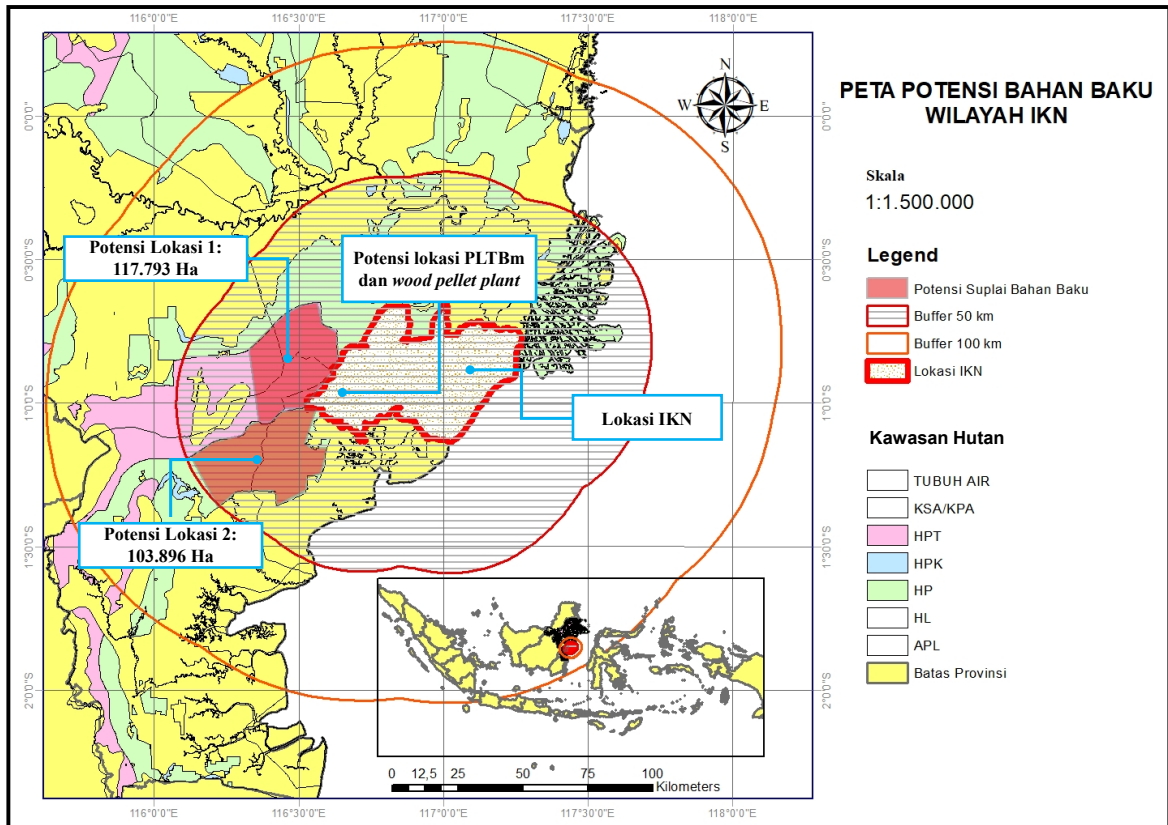
Pada Gambar 1 merupakan skema perhitungan dalam penelitian ini. Dari empat skema ini memanfaatkan potensi residue dengan skema yang berbeda-beda. Pada skema pertama Residu HTI dikonversi menjadi *wood pellet* dan menjadi bahan bakar untuk PLTBm 10 MW. Pada skema ke dua residu langsung digunakan sebagai bahan bakar PLTBm. Sedangkan pada skema ke 3 adalah untuk produksi *steam* yang akan disuplai ke industri dengan menggunakan bahan bakar *wood pellet*. Skema ke 4 residu dimanfaatkan langsung untuk menghasilkan *steam*. Pada penelitian ini harga *steam* merupakan harga di pabrik sehingga perhitungan hanya dibatasi hingga harga *steam* yang keluar dari pabrik dan tidak dihitung hingga ke *tenant*. Harga yang digunakan untuk residu adalah Rp. 493 per kg (USD 0.03/kg). Biaya ini diperoleh dari total biaya pengumpulan, transportasi, dan margin 3%

berdasarkan (Pantaleo et al., 2020; Zamora-Cristales & Sessions, 2016). Untuk biaya transportasi di batasi hanya pada radius 50 km. Potensi Hutan Produksi disekitar IKN dianalisa dengan menggunakan software Arc-GIS dimana data *shapefile* kawasan hutan diperoleh dari (Dinas Komunikasi Informatika Persandian dan Statistik Kabupaten Berau, 2023).

3. Hasil dan Pembahasan

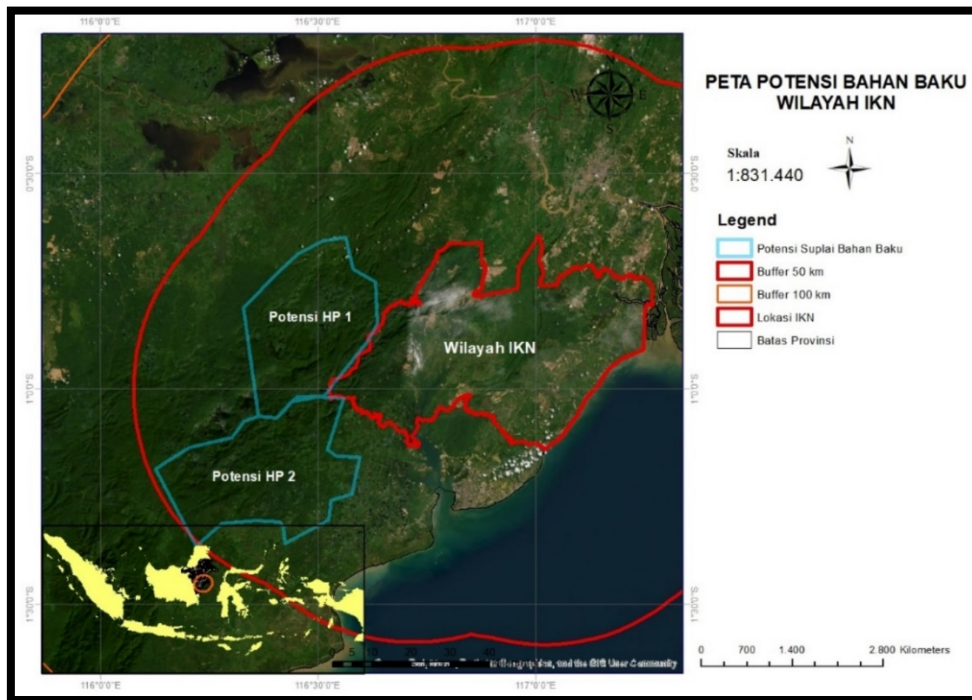
3.1 Analisa Lokasi IKN dan Potensi Suplai Bahan Baku

Pada Gambar 2 merupakan hasil analisa dari potensi suplai bahan baku untuk suplai ke PLTBm. Dilakukan *buffer* pada lokasi IKN dengan radius 50 km dan 100 km. Ini bertujuan untuk membatasi suplai bahan baku dan jarak 50 km merupakan jarak yang memungkinkan untuk mensuplai bahan baku dari kawasan Hutan Produksi. Terdapat dua lokasi yang berpotensi untuk mensuplai bahan baku, lokasi pertama memiliki luas konsesi 117.793 Ha dan lokasi ke dua adalah 103.896 Ha. Selain itu, apabila melihat *buffer* 100 km, potensi suplai bahan baku masih terbuka luas untuk mencuplai ke PLTBm. Hanya saja yang menjadi pertimbangan adalah semakin jauh jaraknya maka akan mempengaruhi harga bahan baku. Dengan total luas lahan Hutan Produksi 221.689 Ha, maka diperoleh potensi residu sebesar 847.960 ton residu hasil hutan. Dengan mengasumsikan bahwa kebutuhan maksimal residu hasil hutan 100.014 ton per tahun (Gambar 1) maka dapat mensuplai bahan baku hingga 8.4 tahun. Namun apabila kebutuhan bahan baku minimum 76.963 ton per tahun maka akan dapat mensuplai bahan baku ke PLTBm hingga 11 tahun ke depan. Oleh karena itu sangat penting untuk merencanakan penanaman kembali tanaman yang memiliki umur rotasi cepat seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Pada Gambar 2 merupakan hasil verifikasi melalui citra satelit bahwa wilayah HP 1 dan HP 2 yang berpotensi untuk mensuplai bahan baku masih bertutupan hutan. Sehingga ke dua lokasi ini memiliki potensi yang baik untuk mensuplai bahan baku ke PLTBm. Studi ini pada dasarnya memberikan gambaran apabila suplai listrik berasal dari pembangkit listrik tenaga biomassa. Satu hektar HTI dapat menghasilkan 3.8 ton residu, penggunaan bahan bakar residu memerlukan luas lahan HTI yang cukup luas untuk menjamin operasional pembangkit. PLTBm 10 MW ini tentunya dapat menjadi acuan apabila akan melakukan pengembangan PLTBm dengan kapasitas yang lebih besar lagi. Dengan kapasitas 10 MW lebih layak untuk mensuplai kebutuhan listrik atau *steam* pada pusat industri seperti Kawasan Ekonomi Khusus. Karena pengembangan pembangkit dengan kapasitas yang berbesar akan memerlukan suplai bahan baku yang lebih tinggi dari lahan HTI yang lebih luas. Sehingga beresiko terhadap operasional PLTBm yang kurang optimal karena suplai bahan baku yang terbatas.



Note: KSA: Kawasan Suaka Alam, HPT: Hutan Produksi Terbatas, HPK: Hutan Produksi Konversi, HP: Hutan Produksi, HL: Hutan Lindung, APL: Area Penggunaan Lain

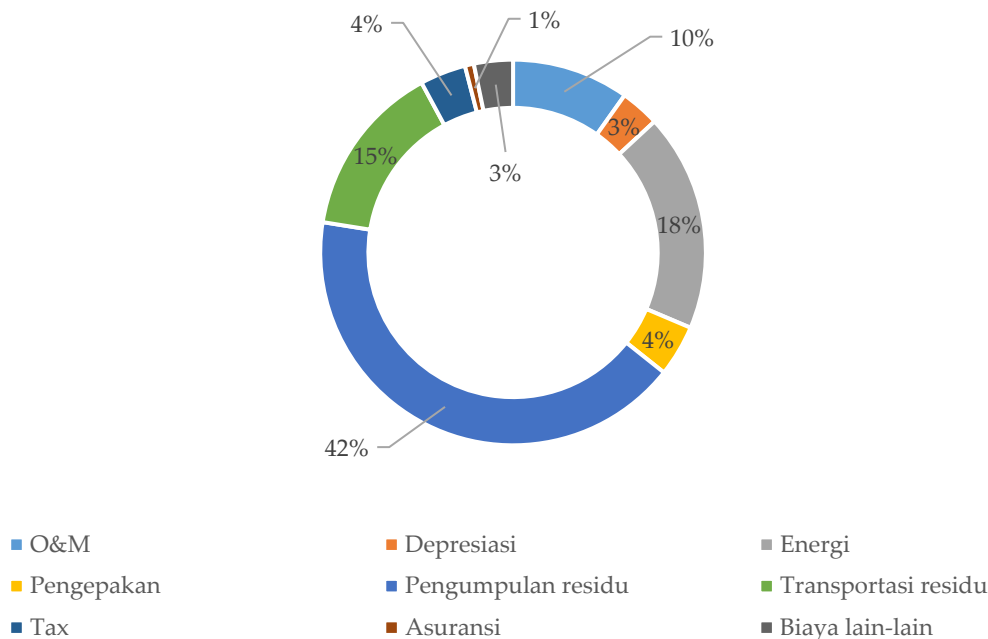
Gambar 2. Analisa Spasial Potensi Suplai Bahan Baku



Gambar 3. Overview potensi hutan produksi melalui citra satelit

3.2 Hasil Analisa Keekonomian Pabrik *Wood Pellet*

Gambar 4 merupakan struktur biaya produksi dari *wood pellet*. Dari hasil estimasi biaya produksi 42% total biaya merupakan biaya pengumpulan residu dan 15% nya adalah untuk distribusi bahan baku. Setelah itu biaya energi 19% dari total biaya. Dari hasil analisa ini menunjukkan bahwa biaya bahan baku yang terdiri dari pengumpulan residu, pengepakan residu, dan distribusi bahan baku berkontribusi sebesar 61% dari total biaya. Ini sejalan dengan strudi yang dilakukan oleh (Nabavi et al., 2020), bahwa biaya bahan baku (*woody raw material and packaging*) berkontribusi paling tinggi dapat mencapai 87% dari total biaya produksi. Dari hasil estimasi ini diperoleh biaya produksi Rp. 1.176/kg. Harga dari hasil perhitungan ini merupakan harga di pabrik *wood pellet*. Apabila produk akan digunakan pada lokasi yang cukup jauh maka komponen biaya transportasi perlu dimasukkan. Dari hasil ini menunjukkan bahwa biaya variabel memainkan peran paling besar yaitu 82% dari total biaya produksi *wood pellet*.



Gambar 4. Struktur biaya produksi *woodpellet*

Hasil perhitungan keekonomian pabrik *wood pellet* ditunjukkan pada Tabel 3. Harga minimum *wood pellet* yang harus dibeli adalah Rp. 1,380/kg. Dengan menggunakan harga minimum ini diperoleh nilai IRR 13 %, NPV USD 3 juta, dan *payback period* 8 tahun. Hasil keekonomian ini diperoleh dari *by product* pada saat proses produksi Hutan Tanaman Industri. Saat ini sebagian produsen *wood pellet* memperoleh memperoleh bahan baku dari industri-industri pengolahan kayu berupa serbuk kayu. Masih sedikit industri yang terintegrasi dari hulu ke hilir. Sehingga hanya beberapa perusahaan besar saja yang mampu memiliki sertifikasi Forest Stewarship Council (FSC). Sertifikasi ini penting untuk dilakukan terkait rantai pengolahan hutan yang lestari. Berdasarkan *interview* dengan beberapa pelaku usaha *wood pellet*, harga *wood pellet* lokal berada dikisaran Rp. 2,200/kg – Rp. 2,600/kg. Sedangkan pangsa pasar ekspor terutama sebagian besar ke Korea harganya dapat mencapai Rp. 2,900 /kg – 3,000/kg. Potensi yang lebih besar lagi, apabila telah memperoleh sertifikat FSC, dapat masuk ke pasar Eropa dengan harga *wood pellet* mencapai Rp. 3,700/kg – Rp. 4,000/kg. Pada Tabel 4 merupakan sensitivitas analisis antara harga *wood pellet* dengan parameter keekonomian. Untuk memperoleh *payback period* 5 tahun harga *wood pellet* harus Rp. 1,700/kg.

Tabel 3. Skenario 1 sensitivitas harga *wood pellet* terhadap keekonomian pabrik

Harga Woodpellet (Rp./kg)	IRR	NPV (USD)	Payback Period
1.200	-2,9%	-30.929.550	30,5
1.300	7,63%	-12.052.087	11.3
1.400	14,4%	6.825.376	7,6
1.500	20%	25.702.840	6
1.700	29%	63.457.768	4,5

3.3 Hasil Analisa Keekonomian PLTBm Bahan Bakar Wood Pellet

Harga beli listrik oleh PLN diatur dalam Peraturan Presiden No. 112/2022, dalam peraturan ini harga listrik dari PLTBm untuk kapasitas 10 MW adalah Rp. 1,459.2/kwh untuk tahun 1-10, sedangkan tahun 11-25 adalah Rp. 1,163/kwh. Pada sistem produksi listrik diperlukan daya 10% (*inhouse power*) untuk operasional pembangkit. Sehingga dalam satu tahun produksi listrik yang dihasilkan adalah 77.785.789 kwh. Dengan menggunakan harga *wood pellet* Rp. 1,380/kg pada Tabel 4 menunjukkan bahwa PLTBm tidak dapat beroperasi secara ekonomis. PLTBm menunjukkan keekonomian yang baik apabila harga *wood pellet* diangka Rp. 50/kg, dengan menggunakan harga ini diperoleh nilai IRR 11,7%, NPV positif dan *payback period* 8.3 tahun. Contoh lainnya yang dapat dijadikan opsi adalah tandan kosong kelapa sawit. Saat ini di Kabupaten Ogan Kemiring Ilir, tandan kosong diharga Rp. 100/kg (Media Perkebunan, 2022). Sedangkan di Medan tandan kosong dihargai Rp. 50/kg – Rp. 100/kg. Namun, harganya dapat mencapai lebih dari Rp. 300/kg apabila jarak dari lokasi tandan kosong ke pabrik cukup jauh, dala, hal ini biaya logistik dalam pengiriman bahan baku memiliki peran yang penting. Pada skema perhitungan ini juga masih sepenuhnya menggunakan *residue* dari produk kehutanan, karena kayu yang dihasilkan memiliki nilai jual yang lebih tinggi apabila diolah menjadi produk lainnya dibandingkan dengan dijadikan bahan bakar. Pada kajian ini radius pengiriman bahan baku hanya dibatasi pada jarak 50 km untuk menekan harga bahan baku.

Opsi lain apabila akan menggunakan *wood pellet* sebagai bahan bakar adalah dengan menaikkan harga listrik. Dari hasil perhitungan harga listrik yang layak apabila menggunakan bahan bakar *wood pellet* adalah Rp. 3,000/kwh. Dengan menggunakan harga listrik ini nilai IRR diperoleh 13,8%, NPV positif, dan *payback period* 7 tahun. Harga listrik keekonomian yang dihasilkan dua kali lipat dari harga listrik normal saat ini. Artinya apabila menggunakan *wood pellet* sebagai bahan bakar PLTBm masih belum cukup ekonomis dalam menghasilkan harga listrik yang terjangkau untuk suplai ke IKN.

Tabel 4. Sensitivitas harga *wood pellet* terhadap keekonomian pembangkit (menggunakan harga listrik Perpres 112/2022)

Harga Wood pellet (Rp/kg)	Harga Listrik (Rp/kwh)	IRR	NPV (USD)	Payback Period (Tahun)
50	Berdasarkan Perpres No. 112/2022	11,7%	4.651.635	8,3
100		11,2%	-97.875.769	8,5
500		6,5%	-108.095.012	11,5
1.380		Negatif	Negatif	Error
1.380	2.000	0,8%	-190.815.634	24
	2.500	8,54%	-65.245.925	10
	3.000	13,8%	60.323.782	7

3.4 Hasil Analisa Keekonomian PLTBm Bahan Bakar Residu Hasil Hutan

Tabel 5 merupakan hasil analisa sensitivitas harga listrik dan bahan baku residue terhadap parameter keekonomian. Dengan menggunakan skema bahan bakar residu, PLTBm menunjukkan nilai keekonomian yang lebih baik. Harga dasar dari residu adalah Rp. 493/kg, diperoleh nilai IRR 5,5%, NPV negatif dan *payback period* 12,2 tahun. Harga dasar ini masih belum cukup ekonomis apabila harga listrik mengacu ke Perpres 112/2022. PLTBm menunjukkan nilai keekonomian yang baik apabila harga bahan baku Rp. 50/kg, diperoleh IRR 11,6%, NPV positif dan *payback period* 8,4 tahun. Opsi menggunakan residu ini menjadi lebih menarik apabila harga listrik dinaikkan menjadi Rp. 2.000/kg akan diperoleh nilai IRR 12,9%, NPV positif, dan *payback period* 7,8 tahun. Ini menunjukkan bahwa opsi penggunaan bahan bakar residu lebih memungkinkan apabila dibandingkan dengan menggunakan *wood pellet* perbedaan harga listrik keekonomian cukup signifikan. Produk *wood pellet* masih terlalu mahal untuk dijasikan bahan bakar PLTBm, opsi yang paling memungkinkan dalam pemanfaatan *wood pellet* adalah untuk ekspor ke luar negeri. Harga yang dihasilkan cukup menarik, dan pangsa pasar *wood pellet* di luar negeri cukup besar.

Tabel 5. Sensitivitas harga *wood pellet* terhadap keekonomian pembangkit (menggunakan harga listrik Perpres 112/2022)

Harga Residu (Rp/kg)	Harga Listrik (Rp/kwh)	IRR	NPV (USD)	Payback Period (Tahun)
50	Berdasarkan Perpres No. 112/2022	11,6%	2.819.716	8,3
100		11%	-11.539.608	8,6
400		7,0%	-97.695.558	11
493		5,8%	-124.403.902	12,2
493	1.500	7,6%	-94.394.574	11,7
	2.000	12,9%	37.114.242	7,8
	2.500	17,5%	168.623.058	6

3.5 Hasil Analisa Keekonomian Produksi Steam Bahan Bakar Wood Pellet

Dalam estimasi harga keekonomian *steam* dengan menggunakan bahan bakar *wood pellet* minimal harga jual *steam* adalah Rp. 700/kg (harga *wood pellet* Rp. 1,380/kg). Dengan menggunakan harga ini diperoleh nilai IRR 13,7%, NPV positif dan *payback period* 8,3 tahun (Tabel 6). Harga keekonomian *steam* masih menggunakan harga di *plant gate*. Belum sampai ke *tenant*. Untuk estimasi harga yang lebih akurat perlu dilakukan analisa lebih lanjut untuk pembangunan fasilitas distribusi, mulai dari pipa distribusi, *steam accumulator*, *boiler* di *tenant*, kompresor, dll.

Tabel 6. Sensitivitas harga *steam* terhadap keekonomian *steam utility* dengan menggunakan bahan bakar *wood pellet*

Harga Wood pellet (Rp/kg)	Harga Steam (Rp/kg)	IRR	NPV (USD)	Payback Period (Tahun)
1.380	500	5,5%	-158.011.981	17
	600	9,9%	-50.985.566	11
	700 (Harga minimum)	13,7%	56.051.849	8,3

3.6 Hasil Analisa Keekonomian Produksi Steam Bahan Bakar Residu Hasil Hutan

Penggunaan bahan bakar residu hasil hutan sebagai bahan bakar menunjukkan prospek yang lebih baik apabila menggunakan bahan bakar *wood pellet*. Harga *steam* minimal adalah Rp. 470/kg (harga bahan babakar residu Rp. 493/kg) menghasilkan nilai IRR 12.4%, NPV positif, dan *payback period* 9 tahun. Harga *steam* minimal ini jauh lebih rendah apabila menggunakan bahan bakar *wood pellet*. Untuk mengetahui kelayakan harga jual *steam* ke *tenant* perlu dilakukan survey untuk mengetahui *willingness to pay steam* dari *provider steam*. Dari hasil analisa sensitivitas untuk memperoleh *payback period* di bawah 5 tahun, harga *steam* harus diangka Rp. 800/kg (Tabel 7).

Tabel 7. Sensitivitas harga *steam* terhadap keekonomian *steam utility* dengan menggunakan bahan bakar *wood pellet*

Harga Residue (Rp/kg)	Harga Steam (Rp/kg)	IRR	NPV (USD)	Payback Period (Tahun)
493	500	13.6%	55.597.318	8,3
	700	17%	167.697.315	6,7
	800	24%	391.897.307	4,9

3.7 Analisa Hasil dan Strategi Pengembangan Hutan Tanaman Energi

Setiap skenario menghasilkan tingkat keekonomian yang berbeda-beda. Pada skenario penggunaan bahan bakar *wood pellet* untuk menghasilkan energi listrik, harga listrik minimum yang

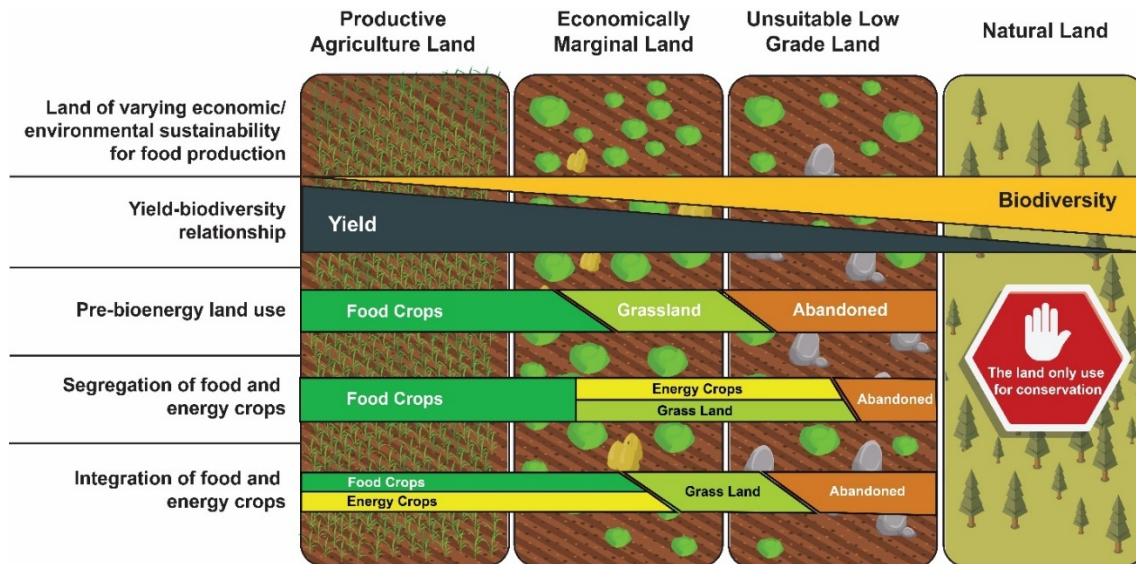
diperoleh cukuplah tinggi. Harga keekonomian dua kali lipat dibandingkan dengan harga listrik subsidi PLN. Dengan menggunakan opsi bahan bakar residu, harga listrik keekonomian perlu ditambah Rp. 500/kWh agar proyek berjalan secara ekonomis. Perbedaan nilai kalori antara *wood pellet* dengan residu hutan yang tidak terlalu jauh namun biaya untuk memperoleh residu hutan lebih terjangkau, mengakibatkan harga listrik bahan bakar residu dapat menjadi lebih murah. Bahan baku merupakan kunci ketahanan suplai energi. Salah satu upaya yang dapat dikembangkan adalah hutan tanaman energi dengan menggunakan *short rotation coppice* atau tanaman dengan umur rotasi yang pendek. Tabel 8 merupakan beberapa komoditas tanaman yang memiliki umur rotasi pendek, salah satu contohnya adalah pohon lamtoro memiliki umur rotasi hanya 3 tahun dan memiliki produktivitas yang tinggi. Tanaman yang memiliki umur rotasi pendek ini berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai energi biomass. Biomass dari hasil kegiatan perkebunan karet, *logging residue*, dan *sawn timber residue* memiliki potensi energi sebesar 152 GJ per tahun (Sapuan & Aditya, 2018).

Tabel 8. Potensi komoditas tanaman yang dapat dijadikan hutan tanaman energi (Hermawan et al., 2023)

Komoditas Hutan	Periode Rotasi (Tahun)	Produktivitas Biomassa (ton/ha/tahun)	Referensi
<i>Tectona Grandis</i> (Jati)	Min 7.5	3.7-4.4	(Borchard et al., 2018; Kiyono et al., 2007; Thapa & Gautam, 1970)
<i>L. leucocephala</i> (Lamtoro)	3	9.62	(Borchard et al., 2018; Gathaara et al., 1991; Kiyono et al., 2007)
<i>Neolamarckia cadamba</i> (Jabon)	4-10	1.8-12	(Mok & Ho, 2019; Sarjono et al., 2017)
<i>Albizia chinensis</i> (Sengon)	5-7		(Aulia et al., 2022; Borchard et al., 2018)
<i>Calliandra calothyrsus</i> (Kaliandra)	10-20 (tinggi 3 m dapat dipanen bulan)	6-24	(Borchard et al., 2018)
<i>Gliricidia sepium</i> (Gamal)	5	2-12	(Borchard et al., 2018)

Pengembangan hutan tanaman energi dapat diupayakan melalui pemerintah atau melalui badan usaha. Apabila diupayakan melalui pemerintah dapat berupa kebijakan mandatori. Penggunaan mandatori yang umum saat ini adalah untuk bahan bakar. Seperti program mandatori biodiesel dan di Eropa mandatori bahan bakar bio-Compress Natural Gas (bioCNG) yang mewajibkan pencampuran bahan bakar gas dengan biogas (Goulding et al., 2017; Prussi et al., 2022). Program mandatori ini dinilai dapat mendorong pengembangan hutan tanaman energi dan pembangunan PLTBm yang lebih masif lagi. Seperti di Inggris telah mengembangkan *short rotation coppice* (SRC) dari tanaman *willow* dan *miscanthus* untuk pembangkit listrik biomassa (Ford et al., 2024). Ke dua tanaman ini memiliki tingkat ketahanan yang cukup tinggi dan membutuhkan input tidak terlalu tinggi, cocok dikembangkan pada daerah-daerah marginal atau lahan kurang produktif (Gambar 5).

Gambar 5 merupakan tipe-tipe lahan berdasarkan kualitasnya, berdasarkan Dauber & Miyake, 2016 dan Hermawan et al., 2023, pengembangan hutan tanaman energi dapat diintegrasikan dengan tanaman pangan pada lahan yang produktif. Namun, pada lahan yang kurang produktif (marginal) dapat ditanam tanaman energi atau hutan energi sebagai bahan baku energi terbarukan. Menurut (Zahrosa & Sari, 2020), luas lahan marginal di Indonesia adalah 157.246.565 hektar, namun yang dapat dimanfaatkan adalah 91.904.643 hektar. Salah satu contoh di Indonesia yang telah dilakukan adalah pengembangan hutan energi di Pulau Halmahera. Konsep hutan energi ini adalah untuk pencadangan kawasan hutan produksi yang diperuntukkan untuk hutan tanaman energi sebagai suplai bahan baku PLTBm dengan total luas lahan HTI mencapai 11.000 hektar (ESDM, 2020). Pemberian insentif merupakan kunci keberhasilan pengembangan hutan tanaman energi. Di US pengembangan tanaman energi menggunakan *switchgrass* untuk *bioelectricity*. Insentif diberikan terhadap harga listrik melalui program *Renewable Portfolio Standard* (RPS) dan kebijakan *cap & trade* pada emisi (Sands, 2017). Pemberian insentif sangatlah penting bagi pengembangan hutan tanaman energi sebagai upaya peningkatan bauran energi terbarukan. Opsi mekanisme insentif yang dapat diberikan adalah mekanisme perdagangan karbon dengan besaran emisi yang dapat dikurangi dengan adanya pengembangan hutan tanaman energi. Implementasi perdagangan karbon ini sukses di beberapa negara mendorong program-program energi terbarukan menjadi lebih kompetitif dan bahkan mendorong penggunaan *green technology* menjadi lebih masif (Hu et al., 2023).



Gambar 5. Skema pemanfaatan lahan berdasarkan tipenya (Dauber & Miyake, 2016; Hermawan et al., 2023)

4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini terdapat potensi Hutan Produksi yang akan mensuplai bahan baku untuk bahan bakar PLTBm dengan total luas lahan 221.689 Ha. Potensi Hutan Produksi ini berada pada radius 50 km dari wilayah IKN dengan kondisi tutupan hutan cukup baik. Berdasarkan hasil perhitungan keekonomian pabrik *wood pellet* harga keekonomian *wood pellet* adalah Rp. 1.380/kg. Dengan menggunakan harga ini diperoleh nilai IRR 13%, NPV positif, dan *payback period* 8 tahun. Berdasarkan perhitungan keekonomian, pada skenario pertama yaitu pemanfaatan *wood pellet* untuk bahan bakar PLTBm, harga minimum listrik adalah Rp. 3.000/kwh. Sedangkan apabila menggunakan bahan bakar residu harga listrik minimum Rp. 2.000/kwh maka akan memperoleh nilai IRR 13,9%, NPV positif, dan *payback period* 7,8 tahun. Terdapat *gap* harga listrik yang cukup tinggi apabila menggunakan *wood pellet* sebagai bahan bakar PLTBm. Pada dasarnya ke dua harga listrik ini masih di atas harga listrik normal, sehingga terdapat opsi untuk memproduksi *steam*. Dengan menggunakan bahan bakar *wood pellet* dalam memproduksi *steam*, harga keekonomian *steam* diperoleh Rp. 700/kg, namun apabila menggunakan residu hasil hutan dengan harga Rp. 493/kg maka harga keekonomian *steam* menjadi jauh lebih rendah yaitu Rp. 470/kg. Namun dalam melakukan *pricing* harga *steam* ini diperlukan survey untuk mengetahui *willingness to pay steam* pada industri yang akan memanfaatkannya.

Saran

Pada studi ini perhitungan *steam* hanya sampai pada *plant gate*. Untuk ke depannya perlu dilakukan analisa terhadap potensi *tenant* sehingga dapat diestimasi total biaya pembangunan fasilitas distribusi *steam*. Untuk saat ini masih belum dilakukan analisa lebih lanjut karena belum diketahui potensi industri apa saja yang akan dibangun di IKN, namun diperoleh gambaran apabila menggunakan opsi PLTBm untuk mensuplai listrik ke IKN. Selain itu, potensi bahan bakar biomassa seperti tandan kosong sawit juga perlu dilakukan analisa perhitungan lebih lanjut. Mengingat Provinsi Kalimantan Timur juga merupakan provinsi penghasil kelapa sawit.

5. Daftar Pustaka

- Aulia, N., Nugroho, Y., & Payung, D. (2022). Evaluasi Pertumbuhan Tanaman Sengon Laut (*Paraserianthes falcataria* (L) Nielsen) Pada Tanah Rawa. *Jurnal Sylva Scientiae*, 3(6), 1072. <https://doi.org/10.20527/jss.v3i6.4724>
- Bappenas. (2021). *Buku Saku Pemandangan Ibu Kota Negara*. Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional.
- Borchard, N., Bulusu, M., Hartwig, A.-M., Ulrich, M., Lee, S., & Baral, H. (2018). Screening Potential Bioenergy Production of Tree Species in Degraded and Marginal Land in the Tropics. *Forests*, 9(10), 594. <https://doi.org/10.3390/f9100594>
- Branan, C. (Ed.). (2002). *Rules of thumb for chemical engineers: A manual of quick, accurate solutions to everyday process engineering problems* (3rd ed). Gulf Professional Publ.
- Casteno, I. (2010). *World's "Largest" Wood Pellet Plant to Feed REW Europe Power Plants*. <https://www.renewableenergyworld.com/baseload/bioenergy/worlds-largest-wood-pellet-plant-to-feed-rew-europe-power-plants/>
- Cormos, A.-M., Petrescu, L., & Cormos, C.-C. (2023). Techno-economic implications of time-flexible operation for iron-based chemical looping combustion cycle with energy storage capability. *Energy*, 278, 127746. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127746>
- Dauber, J., & Miyake, S. (2016). To integrate or to segregate food crop and energy crop cultivation at the landscape scale? Perspectives on biodiversity conservation in agriculture in Europe. *Energy, Sustainability and Society*, 6(1), 25. <https://doi.org/10.1186/s13705-016-0089-5>
- Dinas Kehutanan Provinsi Kalimantan Timur. (2023). *Fungsi Kawasan Hutan Provinsi Kalimantan Timur*. <https://dishutkaltim.com/profil/hutan-kaltim>
- Dinas Komunikasi Informatika Persandian dan Statistik Kabupaten Berau. (2023). *Metadata: Peta Kawasan Hutan berdasarkan SK Men LHK No 278 20171*. https://satudata.beraukab.go.id/layers/geonode:menlhk_278_2017_SZrFg7v0/metadata_detail

- ESDM. (2020). *Optimalkan Hutan Tanaman Energi, Pemerintah Dorong Pembangunan PLTBm di Pulau Halmahera*. <https://www.esdm.go.id/id/berita-unit/direktorat-jenderal-ebtke/optimalkan-hutan-tanaman-energi-pemerintah-dorong-pembangunan-pltbm-di-pulau-halmahera>
- Ewing, M., & Msangi, S. (2009). Biofuels production in developing countries: Assessing tradeoffs in welfare and food security. *Environmental Science & Policy*, 12(4), 520–528. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2008.10.002>
- Ford, J. S., Bale, C. S. E., & Taylor, P. G. (2024). The factors determining uptake of energy crop cultivation and woodland creation in England: Insights from farmers and landowners. *Biomass and Bioenergy*, 180, 107021. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.107021>
- Gathaara, G. N., Glumac, E. L., & Felker, P. (1991). Three-year growth studies of *Leucaena leucocephala* (1094) and *L. pulverulenta* (1001) at two spacings in Texas. *Forest Ecology and Management*, 40(3–4), 189–198. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(91\)90038-W](https://doi.org/10.1016/0378-1127(91)90038-W)
- Golonis, C., Aikaterini, R., Konstantinos, C., Konstantinos, Z., Polixeni, G., & Andreas, P. (2022). Environmental and Economic Assessment of Wood Pellet Production from Trees in Greece. *Smart Grid and Renewable Energy*, 13(07), 137–159. <https://doi.org/10.4236/sgre.2022.137009>
- Goulding, D., Fitzpatrick, D., O'Connor, R., Browne, J. D., & Power, N. M. (2017). Supplying bio-compressed natural gas to the transport industry in Ireland: Is the current regulatory framework facilitating or hindering development? *Energy*, 136, 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.037>
- Hermawan, E., Adiarso, A., Setiadi, S., & Hidayat, D. (2023). Strategy for the implementation of sustainable green fuels in Indonesia. *ECONOMICS AND POLICY OF ENERGY AND THE ENVIRONMENT*, 1(1), pp 103-139. <https://doi.org/DOI: 10.3280/EFE2023-001006>
- Hu, H., Qi, S., & Chen, Y. (2023). Using green technology for a better tomorrow: How enterprises and government utilize the carbon trading system and incentive policies. *China Economic Review*, 78, 101933. <https://doi.org/10.1016/j.chieco.2023.101933>
- Indroyono, S. (2021). *Strategi Untuk Penyediaan Bahan Baku Kayu Dari Hutan Tanaman yang Prospektif untuk Bahan Baku Industri*. FGD Asosiasi Pengusaha Kayu Indonesia, Jakarta.
- IRENA. (2019). *Solid biomass supply for heat and power – Technology Brief* (pp. 27–28).
- Kementerian ESDM. (2023). *Potensi Biomassa Menjanjikan, Indonesia Prediksi Hasilkan Listrik Setara 56,97 GW*. <https://ebtke.esdm.go.id/post/2023/10/06/3619/potensi.biomassa.menjanjikan.indonesia.prediksi.hasilkan.listrik.setara.5697.gw>
- Khan, S. R., Zeeshan, M., Fatima, S., Ciolkosz, D., Dimitriou, I., & Jin, H. (2023). A comparative techno-economic analysis of combined oil and power production from pyrolysis and co-pyrolysis plants utilizing rice straw and scrap rubber tires. *Fuel*, 348, 128639. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128639>

- Khorshidi, Z., Ho, M. T., & Wiley, D. E. (2014). The impact of biomass quality and quantity on the performance and economics of co-firing plants with and without CO₂ capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 21, 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.12.011>
- Kiyono, Y., Oo, M. Z., Oosumi, Y., & Rachman, I. (2007). Tree Biomass of Planted Forests in the Tropical Dry Climatic Zone: Values in the Tropical Dry Climatic Zones of the Union of Myanmar and the Eastern Part of Sumba Island in the Republic of Indonesia. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*, 41(4), 315–323. <https://doi.org/10.6090/jarq.41.315>
- Kontan. (2016). *Charta Putra Bangun PLTBM di Bali*. industri.kontan.co.id/news/charta-putra-bangun-pltbn-di-mentawai-dan-bali
- Kumar, R., Sharma, A. Kr., & Tewari, P. C. (2015). Cost analysis of a coal-fired power plant using the NPV method. *Journal of Industrial Engineering International*, 11(4), 495–504. <https://doi.org/10.1007/s40092-015-0116-8>
- Li, R., Jin, X., Yang, P., Sun, X., Zhu, G., Zheng, Y., Zheng, M., Wang, L., Zhu, M., Qi, Y., Huang, Z., Zhao, L., Wang, D., & Yang, W. (2023). Techno-economic analysis of a wind-photovoltaic-electrolysis-battery hybrid energy system for power and hydrogen generation. *Energy Conversion and Management*, 281, 116854. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116854>
- Lilienthal, P., Lambert, T., & Gilman, P. (2004). Computer Modeling of Renewable Power Systems. In *Encyclopedia of Energy* (pp. 633–647). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00522-2>
- Maltsoglou, I., Kojakovic, A., Rincón, L. E., Felix, E., Branca, G., Valle, S., Gianvenuti, A., Rossi, A., Thulstrup, A., & Thofern, H. (2015). Combining bioenergy and food security: An approach and rapid appraisal to guide bioenergy policy formulation. *Biomass and Bioenergy*, 79, 80–95. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.02.007>
- Media Perkebunan. (2022). *Wilmar Pasok Tandan Kosong Untuk Budidaya Jamur*. <https://mediaperkebunan.id/wilmar-pasok-tandan-kosong-untuk-budidaya-jamur/>
- Mok, P.-K., & Ho, W.-S. (2019). Rapid in vitro Propagation and Efficient Acclimatisation Protocols of *Neolamarckia cadamba*. *Asian Journal of Plant Sciences*, 18(4), 153–163. <https://doi.org/10.3923/ajps.2019.153.163>
- Nabavi, V., Azizi, M., Tarmian, A., & Ray, C. D. (2020). Feasibility study on the production and consumption of wood pellets in Iran to meet return-on-investment and greenhouse gas emissions targets. *Renewable Energy*, 151, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.140>
- NREL. (2021). *Power Plant Useful Life*. <https://www.nrel.gov/analysis/tech-footprint.html>
- Pantaleo, A., Villarini, M., Colantoni, A., Carlini, M., Santoro, F., & Rajabi Hamedani, S. (2020). Techno-Economic Modeling of Biomass Pellet Routes: Feasibility in Italy. *Energies*, 13(7), 1636. <https://doi.org/10.3390/en13071636>

- PLN. (2020). *Statistik PLN 2020* (p. 22). Perusahaan Listrik Negara. <https://web.pln.co.id/statics/uploads/2021/07/Statistik-PLN-2020.pdf>
- PLN. (2021). *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2021-2031*. <https://web.pln.co.id/statics/uploads/2021/10/ruptl-2021-2030.pdf>
- Prussi, M., Panoutsou, C., & Chiaramonti, D. (2022). Assessment of the Feedstock Availability for Covering EU Alternative Fuels Demand. *Applied Sciences*, 12(2), 740. <https://doi.org/10.3390/app12020740>
- Richi Machinery. (2013). *Investment Proposal For Annual Production of 50,000 Tons Biomass Wood Branch Straw Bamboo Sawdust Pellet Production Line Project*. <https://www.richimachinery.com/customer-guide/investment-proposal-for-annual-production-of-50000-tons-biomass-wood-branch-straw-bamboo-sawdust-pellet-production-line-project.html>
- Roman, K., Barwicki, J., Rzodkiewicz, W., & Dawidowski, M. (2021). Evaluation of Mechanical and Energetic Properties of the Forest Residues Shredded Chips during Briquetting Process. *Energies*, 14(11), 3270. <https://doi.org/10.3390/en14113270>
- Ross, M., & Bindra, H. (2021). Estimating energy storage size for Nuclear-Renewable hybrid energy systems using data-driven stochastic emulators. *Journal of Energy Storage*, 40, 102787. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102787>
- Sands, R. D. (2017). *Dedicated Energy Crops and Competition for Agricultural Land* (223; pp. 5–6). United States Department of Agriculture.
- Saosee, P., Sajjakulnukit, B., & Gheewala, S. H. (2020). Feedstock Security Analysis for Wood Pellet Production in Thailand. *Energies*, 13(19), 5126. <https://doi.org/10.3390/en13195126>
- Sapuan, D., & Aditya, W. (2018). Challenges and Policy for Biomass Energy in Indonesia. *International Journal of Business, Economics, and Law*, 15(5), 41–47.
- Saracoglu, N., & Gunduz, G. (2009). Wood Pellets—Tomorrow’s Fuel for Europe. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 31(19), 1708–1718. <https://doi.org/10.1080/15567030802459677>
- Sarjono, A., Lahjie, A. M., Simarankir, B. D. A. S., Kristiningrum, R., & Ruslim, Y. (2017). Carbon sequestration and growth of *Anthocephalus cadamba* plantation in North Kalimantan, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 18(4), 1385–1393. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d180414>
- Simangunsong, B. C. H., Sitanggang, V. J., Manurung, E. G. T., Rahmadi, A., Moore, G. A., Aye, L., & Tambunan, A. H. (2017). Potential forest biomass resource as feedstock for bioenergy and its economic value in Indonesia. *Forest Policy and Economics*, 81, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.03.022>

- Takizawa, H., & Okubo, Y. (2019). *Risk Analysis of Coal-Fired Power Plant Investment in Japan*. Renewable Energy Institute.
- Thapa, H. B., & Gautam, S. K. (1970). Growth performance of *Tectona grandis* in the western Terai of Nepal. *Banko Janakari*, 15(2), 6–12. <https://doi.org/10.3126/banko.v15i2.344>
- Toumbourou, T. D., Dressler, W. H., & Werner, T. T. (2022). Plantations enabling mines: Incremental industrial extraction, social differentiation and livelihood change in East Kalimantan, Indonesia. *Land Use Policy*, 119, 106157. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106157>
- Towler, G., & Sinnott, R. K. (2022). *Chemical engineering design: Principles, practice, and economics of plant and process design* (Third Edition). Butterworth-Heinemann.
- Turton, R., Bailie, R. C., Whiting, W. B., Shaeiwitz, J. A., & Bhattacharyya, D. (2012). *Analysis, synthesis, and design of chemical processes* (Fourth edition). Prentice Hall.
- Vazquez-Sanchez, H., Nagaraja, S. S., Cross, N. R., Hall, D. M., & Mani Sarathy, S. (2023). A techno-economic analysis of a thermally regenerative ammonia-based battery. *Applied Energy*, 347, 121501. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121501>
- Xu, Y., Yang, K., Zhou, J., & Zhao, G. (2020). Coal-Biomass Co-Firing Power Generation Technology: Current Status, Challenges and Policy Implications. *Sustainability*, 12(9), 3692. <https://doi.org/10.3390/su12093692>
- Zahrosa, D. B., & Sari, S. (2020). *LAHAN MARGINAL MENYIMPAN RAGAM POTENSI*. Polije Press. <https://doi.org/10.25047/PPress.41>
- Zamora-Cristales, R., & Sessions, J. (2016). Modeling Harvest Forest Residue Collection for Bioenergy Production. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 37(2), 287–297.