

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Relevan

Penelitian tentang implementasi *co-firing* biomassa menggunakan serbuk gergaji dan batu bara pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), dilakukan dengan menggunakan referensi penelitian dan studi yang telah dilakukan sebelumnya.

Penelitian terkait bertujuan untuk menyediakan bahan perbandingan dan referensi yang dapat memperkaya serta memperkuat referensi dalam penelitian ini. Selain itu, kajian terhadap penelitian sebelumnya berfungsi untuk mengetahui celah bidang ilmu pengetahuan yang belum pernah diteliti, yang dapat memberikan kebaruan (*novelty*) pada penelitian-penelitian selanjutnya. Oleh karena itu, dalam kajian pustaka ini, peneliti mencantumkan beberapa hasil penelitian terdahulu yang relevan sebagai berikut:

Tabel 2.1 Penelitian Relevan

No.	Penulis/ Tahun/ Publikasi	Judul Penelitian	Metode dan Hasil Penelitian
1	R. Saidur, E.A. Abdelaziz, A. Demirbas, M.S. Hossain, dan S. Mekhilef, 2011 & Elsevier	<i>A review on biomass as a fuel for boilers</i>	Metode yang digunakan adalah analisis komposisi biomassa melalui analisis struktural, <i>proximate</i> , <i>ultimate</i> , dan <i>ash analysis</i> serta evaluasi proses konversi biomassa menjadi bahan bakar melalui berbagai teknologi seperti pembakaran langsung, pirolisis, gasifikasi, fermentasi, <i>anaerobic digestion</i> , dan konversi kimia. Hasil penelitian menunjukkan

No.	Penulis/ Tahun/ Publikasi	Judul Penelitian	Metode dan Hasil Penelitian
			bahwa <i>biomass</i> memiliki potensi energi yang signifikan dengan nilai kalorinya bervariasi tergantung jenis dan komposisinya, serta mampu menggantikan bahan bakar fosil sebagian dalam sistem boiler. Teknologi pembakaran seperti <i>boiler fluidized bed</i> terbukti lebih efisien dan ramah lingkungan untuk <i>biomass</i> dengan kandungan abu tinggi dan rendah kualitas. Selain itu, analisis <i>ash</i> dan volatilitas menunjukkan bahwa <i>biomass</i> memiliki risiko <i>fouling</i> dan <i>slagging</i> yang perlu diatasi melalui optimalisasi proses dan bahan bakar. Secara ekonomi, penggunaan <i>biomass</i> dapat mengurangi ketergantungan terhadap impor bahan bakar dan mendukung pengembangan energi terbarukan, namun membutuhkan inovasi teknologi dan kebijakan pendukung agar

No.	Penulis/ Tahun/ Publikasi	Judul Penelitian	Metode dan Hasil Penelitian
			pengoperasiannya lebih optimal.
2	M. Zhai et al., 2025 & Elsevier	<i>Advancing just transition: The role of biomass co-firing in emission reductions and employment for coal regions</i>	Metode yang digunakan adalah optimisasi berbasis parameter dasar, yang memadukan analisis <i>trade-off</i> antara rasio campuran <i>biomass</i> dan batubara, serta modifikasi metode perhitungan emisi karbon tingkat fasilitas untuk mengukur dampaknya terhadap penciptaan lapangan kerja dan emisi. Model ini mempertimbangkan batasan operasional dan tingkat teknologi, sambil mengintegrasikan evaluasi ekonomi dan sosial untuk menentukan rasio campuran optimal yang memaksimalkan manfaat pekerjaan dan mengurangi emisi karbon, dengan memperhitungkan dinamika regional dan kompleksitas rantai pasokan biomassa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan rasio

No.	Penulis/ Tahun/ Publikasi	Judul Penelitian	Metode dan Hasil Penelitian
			biomass <i>co-firing</i> hingga lebih dari 90% dapat mengubah pola penciptaan lapangan kerja dan menurunkan emisi karbon, tetapi tidak optimal untuk mencapai transisi yang adil karena efisiensi pembangkitan energi menurun dan manfaatnya terbatas dibandingkan dengan energi terbarukan lainnya. Selain itu, ditemukan bahwa intensitas pekerjaan dan emisi karbon berkorelasi positif secara linier, sementara hubungan antara rasio campuran dan keberlanjutan sosial menunjukkan tren menurun non-linier, menunjukkan bahwa strategi campuran biomassa dan batubara perlu disesuaikan secara regional agar mencapai manfaat maksimal serta memastikan keberlanjutan ekonomi dan sosial.
3	Fefria Tanbar, Analisa Sahrijal Purba, Pengujian	Karakteristik <i>Co-Firing</i>	Metode yang digunakan adalah eksperimen di

No.	Penulis/ Tahun/ Publikasi	Judul Penelitian	Metode dan Hasil Penelitian
	Agus Salim Samsudin, Eko Supriyanto, dan Indra A. Aditya, 2021 & Off shore, PLN Puslitbang	biomassa <i>Sawdust</i> Pada PLTU <i>Type Pulverized Coal Boiler Sebagai Bauran Renewable Energy</i>	pembangkit listrik dengan sistem <i>pulverized coal firing</i> dan metode <i>co-firing</i> langsung dengan pencampuran biomassa <i>sawdust</i> sebanyak 5% dan batu bara 95%. Pengujian dilakukan setelah proses stabilisasi beban minimal 1 jam, kemudian pengambilan data dilakukan selama minimal 2 jam dengan interval setiap 15 menit. Parameter utama yang diamati meliputi temperatur keluar mill (MOT), temperatur gas di ujung tungku (FEGT), emisi gas, dan konsumsi bahan bakar spesifik. Pengukuran dilakukan menggunakan alat analisis gas dan kamera infra merah untuk temperatur, serta pengambilan sampel bahan bakar dan emisi secara periodik untuk analisis laboratorium dan evaluasi performa operasi. Hasil menunjukkan bahwa

No.	Penulis/ Tahun/ Publikasi	Judul Penelitian	Metode dan Hasil Penelitian
			<i>co-firing</i> 5% mampu menurunkan temperatur gas keluar tungku (FEGT) sebesar 4,2°C atau, serta mengurangi emisi NO _x dan SO ₂ sebesar 2% hingga 3%. Selain itu, konsumsi bahan bakar spesifik saat <i>co-firing</i> juga lebih rendah sebesar 1,21%, dengan nilai sekitar 0,629 kg/kWh dibandingkan 0,637 kg/kWh saat pembakaran batu bara murni.
4	Premadi Setyoko dan Alief Avicenna Luthfie, 2022 & Jurnal Teknik Mesin, Universitas Mercu Buana	Analisis Kadar Gas Emisi <i>Co-Firing</i> Pada Boiler PLTU Indramayu Menggunakan Campuran <i>Sawdust</i>	Metode penelitian adalah eksperimental pada boiler PLTU Indramayu dengan sistem <i>pulverized coal firing</i> dan metode <i>co-firing</i> langsung menggunakan campuran <i>sawdust</i> sebanyak 5%. Hasil menunjukkan penggunaan campuran <i>sawdust</i> mampu menurunkan emisi gas buang SO ₂ dari 120,84 mg/Nm ² menjadi 106,3 mg/Nm ² dan NO _x dari 365,41 mg/Nm ² menjadi 360,46 mg/Nm ² . Efisiensi

No.	Penulis/ Tahun/ Publikasi	Judul Penelitian	Metode dan Hasil Penelitian
			pembakaran tetap stabil dengan temperatur keluaran mill rata-rata turun sekitar 2,8°C, dan tidak mengganggu kinerja boiler secara signifikan.
5	Mohammad S. Roni, Sudipta Chowdhury, Saleh Mamun, Mohammad Marufuzzaman, William Lein, Samuel Johnson, 2017 & Elsevier	<i>Biomass co-firing technology with policies, challenges, and opportunities: A global review</i>	Metode digunakan adalah tinjauan pustaka komprehensif yang mengevaluasi kebijakan, teknologi, tantangan, dan peluang <i>biomass co-firing</i> secara global. Data dikumpulkan dari laporan organisasi internasional, studi kasus di berbagai negara, dan literatur ilmiah terkini. Analisis dilakukan dengan membandingkan kebijakan nasional, kondisi teknologi, serta potensi dan kendala yang dihadapi di berbagai wilayah melalui studi kualitatif dan analisis deskriptif. Hasil menunjukkan bahwa <i>biomass co-firing</i> memiliki potensi besar untuk mengurangi emisi GRK dan

No.	Penulis/ Tahun/ Publikasi	Judul Penelitian	Metode dan Hasil Penelitian
			mendukung target energi terbarukan di berbagai negara, terutama di Eropa, Amerika Utara, dan Asia.
6	Morteza Jafarsalehi, Mohammad Mashayekh, Mohammad Bagher Miranzadeh, Nezam Mirzaei, dan Mehdi Ebrahimi, 2025 & Elsevier	<i>Primary measures for cleaner biomass combustion to reduce NOx: A narrative review on solid biomass fuels, NOx sources, small-scale boilers, auxiliary equipment, fuel management and fuel quality improvement</i>	Metode digunakan tinjauan naratif yang mengumpulkan dan menganalisis literatur terbaru dari tahun 2010 hingga 2024 mengenai teknologi dan strategi pengurangan NO _x pada pembakaran biomassa. Penelitian ini mengkaji berbagai sumber literatur yang berkaitan dengan sumber NO _x , teknologi boiler kecil, pengelolaan bahan bakar, dan teknik peningkatan kualitas bahan bakar, serta melakukan evaluasi terhadap efektivitas dan tantangan dari masing-masing pendekatan untuk menghasilkan rangkuman rekomendasi pengurangan emisi NO _x secara <i>primary</i> dalam konteks penggunaan biomassa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengelolaan bahan

No.	Penulis/ Tahun/ Publikasi	Judul Penelitian	Metode dan Hasil Penelitian
			bakar secara optimal melalui strategi agronomi untuk menurunkan kandungan nitrogen dapat secara signifikan mengurangi emisi NO_x. Kombinasi metode ini, mampu menurunkan jumlah NO_x yang dihasilkan, sekaligus meningkatkan efisiensi energi dan keberlanjutan penggunaan biomassa sebagai sumber energi bersih.
7	Ari D. Pasek, Mochamad Soleh, Firman B. Juangsa, dan Prihadi S. Darmanto, 2024 & IOP Conference Series, ITB	<i>Progress on Biomass Coal Co-firing for Indonesia Power Plant</i>	Metode yang digunakan meliputi evaluasi literatur terkait manfaat dan tantangan <i>co-firing</i> biomassa dengan batubara, analisis sifat fisik dan kimia biomassa lokal di Indonesia, serta komputasi simulasi dan perhitungan teoretis untuk menilai pengaruh biomassa terhadap proses pembakaran dan <i>slagging</i> dalam pembangkit listrik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan biomassa dalam <i>co-firing</i> dengan

No.	Penulis/ Tahun/ Publikasi	Judul Penelitian	Metode dan Hasil Penelitian
			batubara dapat mengurangi emisi CO₂ secara signifikan, dengan sebagian besar percobaan menunjukkan potensi pengurangan emisi hingga sekitar 10-30% tergantung proporsi biomasanya. Selain itu, pre-treatment seperti pengeringan dan <i>pelletizing</i> terbukti mampu meningkatkan densitas energi biomassa dan mengurangi potensi slagging serta masalah operasional lainnya. Percobaan di berbagai jenis pembangkit, termasuk <i>pulverized coal</i>, CFB, dan stoker, menunjukkan bahwa energi pembakaran tetap stabil hingga sekitar 30% biomassa dalam campuran tanpa mengurangi kapasitas output secara signifikan, dan penggunaan biomassa dari berbagai jenis sumber juga membantu menurunkan emisi sulfur dan nitrogen oksida.

No.	Penulis/ Tahun/ Publikasi	Judul Penelitian	Metode dan Hasil Penelitian
8	Rajarshi Roy, Spencer Bandi, Xiaolong Li, Brian Schooff, Regan Kuttler, Megan Aichele, Scott Montgomery, Jacob Tuttle, Stacey J. Smith, Jost O.L. Wendt, Brian D. Iverson, dan Andrew Fry, 2024 & Elsevier	<i>Synergistic reduction of SO₂ emissions while co-firing biomass with coal in pilot-scale (1.5 MWth) and full-scale (471 MWe) combustors</i>	Metode yang digunakan meliputi eksperimen <i>co-firing</i> biomass dan batu bara pada fasilitas pilot (1.5 MWh) dan skala penuh (471 MW) menggunakan berbagai proporsi campuran bahan bakar, dengan pengukuran konsentrasi SO ₂ gases secara langsung. Hasil penelitian menunjukkan bahwa <i>co-firing</i> biomassa menghasilkan pengurangan sinergistik emisi SO ₂ , terutama disebabkan oleh peran utama kalsium dalam abu yang membantu penyerapan sulfur, selain efek pengenceran. Pada percobaan skala penuh, campuran 85/15 % batu bara dan biomassa mencapai penurunan emisi SO ₂ sebesar 28,1% dan menurunkan penggunaan bahan desulfurisasi sebesar 22,1%, sehingga mengurangi biaya operasional. Selain itu, analisis abu dan simulasi

No.	Penulis/ Tahun/ Publikasi	Judul Penelitian	Metode dan Hasil Penelitian
			thermodinamika mengonfirmasi bahwa mayoritas sulfur diubah menjadi sulfat yang stabil dalam abu, mengurangi pelepasan SO ₂ ke atmosfer secara signifikan.
9	Prabir Basu, James Butler, Mathias A. Leon, 2011 & Elsevier	<i>Biomass co-firing options on the emission reduction and electricity generation costs in coal-fired power plants</i>	Metode yang digunakan meliputi analisis ekonomis dan evaluasi teknis terhadap berbagai opsi <i>co-firing biomass</i> di PLTU. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa <i>co-firing</i> biomassa di pembangkit batu bara efektif mengurangi emisi CO ₂ dengan biaya lebih rendah dibandingkan teknologi lain seperti sequestration karbon. Metode langsung paling murah dan sederhana, sedangkan metode tidak langsung dan gasifikasi lebih fleksibel untuk rasio biomassa tinggi meski investasi lebih besar. <i>Co-firing</i> menawarkan pengurangan biaya listrik, insentif emisi, dan manfaat

No.	Penulis/ Tahun/ Publikasi	Judul Penelitian	Metode dan Hasil Penelitian
			sosial, menjadikannya solusi ekonomis dan ramah lingkungan untuk pembangkit listrik berbahan batu bara.
10	Mochamad Soleh, Azaria Haykal Ahmad, Firman Bagja Juangsa, Prihadi Setyo Darmanto, dan Ari Darmawan Pasek, 2023 & Clean Energy, ITB	<i>Impact Of Different Kinds Of Biomass Mixtures On Combustion Performance, Interaction And Synergistic Effects In Cofiring Of Coal And Biomass In Steam Power Plants</i>	Metode yang digunakan meliputi analisis kimia dan karakterisasi bahan bakar, seperti analisis <i>ultimate</i> dan <i>proximate</i> untuk mengetahui komposisi bahan bakar biomassa dan batu bara, serta analisis termogravimetri diferensial (DTG) untuk menentukan karakteristik pembakaran dan kinetika reaksi pembakaran. Selain itu, dilakukan simulasi pembakaran menggunakan analisis <i>Computational Fluid Dynamics</i> (CFD) pada boiler berkapasitas 600 MW untuk memodelkan efek interaksi dan sinergi dari campuran bahan bakar selama proses pembakaran di dalam boiler. Hasil menunjukkan bahwa pencampuran beberapa jenis biomassa (serbuk kayu, sekam padi, dan bahan padat

No.	Penulis/ Tahun/ Publikasi	Judul Penelitian	Metode dan Hasil Penelitian
			daur ulang) dengan batubara dalam pembakaran di PLTU menghasilkan sinergi positif yang meningkatkan kinerja pembakaran tanpa terjadi derating daya yang signifikan hingga kandungan biomassa mencapai sekitar 30% berdasarkan massa. Analisis karakteristik pembakaran seperti temperatur <i>ignition</i>, temperatur puncak, dan temperatur <i>burnout</i> serta simulasi menggunakan CFD mengindikasikan bahwa campuran biomassa tersebut dapat mempercepat proses pembakaran dan meningkatkan efisiensi termal, selain secara signifikan mengurangi emisi CO₂ dari sekitar 21,5% menjadi 15,9% dalam gas buang, mendukung program pengurangan gas rumah kaca dan strategi rendah karbon di Indonesia.

Dalam penelitian diatas dapat dijelaskan bahwasannya *biomass* memiliki potensi energi yang signifikan dengan nilai kalorinya bervariasi tergantung jenis dan komposisinya, serta mampu menggantikan bahan bakar fosil secara sebagian dalam sistem boiler. Teknologi pembakaran seperti boiler *fluidized bed* terbukti lebih efisien dan ramah lingkungan untuk *biomass* dengan kandungan abu tinggi dan rendah kualitas. Selain itu, analisis *ash* dan volatilitas menunjukkan bahwa *biomass* memiliki risiko *fouling* dan *slagging* yang perlu diatasi melalui optimalisasi proses dan bahan bakar. Secara ekonomi, penggunaan *biomass* dapat mengurangi ketergantungan terhadap impor bahan bakar dan mendukung pengembangan energi terbarukan, namun membutuhkan inovasi teknologi dan kebijakan pendukung agar pengoperasiannya lebih optimal (R. Saidur, E.A. Abdelaziz, A. Demirbas, M.S. Hossain, dan S. Mekhilef, 2011). Peningkatan rasio *biomass co-firing* hingga lebih dari 90% dapat mengubah pola penciptaan lapangan kerja dan menurunkan emisi karbon, tetapi tidak optimal untuk mencapai transisi yang adil karena efisiensi pembangkitan energi menurun dan manfaatnya terbatas dibandingkan dengan energi terbarukan lainnya. Selain itu, ditemukan bahwa intensitas pekerjaan dan emisi karbon berkorelasi positif secara linier, sementara hubungan antara rasio campuran dan keberlanjutan sosial menunjukkan tren menurun non-linier, menunjukkan bahwa strategi campuran biomassa dan batubara perlu disesuaikan secara regional agar mencapai manfaat maksimal serta memastikan keberlanjutan ekonomi dan sosial (M. Zhai et al., 2025). *Co-firing* 5% mampu menurunkan temperatur gas keluar tungku (FEGT) sebesar 4,2°C, serta mengurangi emisi NO_x dan SO₂ masing-masing sebesar 2% hingga 3%. Selain itu, konsumsi bahan bakar spesifik saat *co-firing* juga lebih rendah sebesar 1,21%, dengan nilai sekitar 0,629 kg/kWh dibandingkan 0,637 kg/kWh saat pembakaran batu bara murni (Fefria Tanbar, Sahrijal Purba, Agus Salim Samsudin, Eko Supriyanto, dan Indra A. Aditya, 2021). Penggunaan campuran *sawdust* sebanyak 5% dalam *co-firing* di PLTU Indramayu mampu menurunkan emisi gas buang SO₂ dari 120,84 mg/Nm² menjadi 106,3 mg/Nm² dan NO_x dari 365,41 mg/Nm² menjadi 360,46 mg/Nm². Efisiensi pembakaran tetap stabil dengan temperatur keluaran mill rata-rata turun sekitar 2,8°C, dan tidak mengganggu kinerja boiler secara signifikan (Premadi Setyoko dan Alief Avicenna Luthfie, 2022). *Biomass co-firing* memiliki potensi besar untuk mengurangi emisi GRK

dan mendukung target energi terbarukan di berbagai negara, terutama di Eropa, Amerika Utara, dan Asia (Mohammad S. Roni, Sudipta Chowdhury, Saleh Mamun, Mohammad Marufuzzaman, William Lein, Samuel Johnson, 2017). Pengelolaan bahan bakar secara optimal melalui strategi agronomi untuk menurunkan kandungan nitrogen, dapat secara signifikan mengurangi emisi NO_x . Kombinasi metode ini, mampu menurunkan jumlah NO_x yang dihasilkan, sekaligus meningkatkan efisiensi energi dan keberlanjutan penggunaan biomassa sebagai sumber energi bersih (Morteza Jafarsalehi, Mohammad Mashayekh, Mohammad Bagher Miranzadeh, Nezam Mirzaei, dan Mehdi Ebrahimi, 2025). Penggunaan biomassa dalam *co-firing* dengan batu bara dapat mengurangi emisi CO_2 secara signifikan, dengan sebagian besar percobaan menunjukkan potensi pengurangan emisi hingga sekitar 10-30% tergantung proporsi biomasanya. Selain itu, pre-treatment seperti pengeringan dan *pelletizing* terbukti mampu meningkatkan densitas energi biomassa dan mengurangi potensi *slagging* serta masalah operasional lainnya. Percobaan di berbagai jenis pembangkit, termasuk *pulverized coal*, CFB, dan *stoker*, menunjukkan bahwa energi pembakaran tetap stabil hingga sekitar 30% biomassa dalam campuran tanpa mengurangi kapasitas *output* secara signifikan, dan penggunaan biomassa dari berbagai jenis sumber juga membantu menurunkan emisi sulfur dan nitrogen oksida (Ari D. Pasek, Mochamad Soleh, Firman B. Juangsa, dan Prihadi S. Darmanto, 2024). *Co-firing* biomassa dengan batu bara menghasilkan pengurangan sinergistik emisi SO_2 , terutama disebabkan oleh peran utama kalsium dalam abu yang membantu penyerapan sulfur, selain efek pengenceran. Pada percobaan skala penuh, campuran 85/15 % batu bara dan biomassa mencapai penurunan emisi SO_2 sebesar 28,1% dan menurunkan penggunaan bahan desulfurisasi sebesar 22,1%, sehingga mengurangi biaya operasional. Selain itu, analisis abu dan simulasi termodinamika mengonfirmasi bahwa mayoritas sulfur diubah menjadi sulfat yang stabil dalam abu, mengurangi pelepasan SO_2 ke atmosfer secara signifikan (Rajarshi Roy, Spencer Bandi, Xiaolong Li, Brian Schooff, Regan Kuttler, Megan Aichele, Scott Montgomery, Jacob Tuttle, Stacey J. Smith, Jost O.L. Wendt, Brian D. Iverson, dan Andrew Fry, 2024). *Co-firing* biomassa di pembangkit batu bara efektif mengurangi emisi CO_2 dengan biaya lebih rendah dibandingkan teknologi lain seperti *sequestration* karbon. Metode langsung paling murah dan sederhana, sedangkan metode

tidak langsung dan gasifikasi lebih fleksibel untuk rasio biomassa tinggi meski investasi lebih besar. *Co-firing* menawarkan pengurangan biaya listrik, insentif emisi, dan manfaat sosial, menjadikannya solusi ekonomis dan ramah lingkungan untuk pembangkit listrik berbahan batu bara (Prabir Basu, James Butler, Mathias A. Leon, 2011). Pencampuran beberapa jenis biomassa (serbuk kayu, sekam padi, dan bahan padat daur ulang) dengan batubara dalam pembakaran di pembangkit listrik tenaga uap menghasilkan sinergi positif yang meningkatkan kinerja pembakaran tanpa terjadi derating daya yang signifikan hingga kandungan biomassa mencapai sekitar 30% berdasarkan massa. Analisis karakteristik pembakaran seperti temperatur *ignition*, temperatur puncak, dan temperatur *burnout* serta simulasi menggunakan CFD mengindikasikan bahwa campuran biomassa tersebut dapat mempercepat proses pembakaran dan meningkatkan efisiensi termal, selain secara signifikan mengurangi emisi CO₂ dari sekitar 21,5% menjadi 15,9% dalam gas buang, mendukung program pengurangan gas rumah kaca dan strategi rendah karbon di Indonesia (Mochamad Soleh bersama rekan-rekannya seperti Azaria Haykal Ahmad, Firman Bagja Juangsa, Prihadi Setyo Darmanto, dan Ari Darmawan Pasek, 2023).

Dari semua hasil penelitian diatas belum ada pembahasan mengenai analisis secara menyeluruh terkait komparasi pemakaian bahan bakar biomassa *sawdust* dengan batu bara 100% yang mencakup efisiensi boiler, kebutuhan daya listrik, biaya untuk menentukan jenis bahan bakar yang tepat & berkelanjutan kedepannya dan emisi gas buang. Maka dengan penelitian ini, ditambahkan secara menyeluruh untuk analisis komparasi pemakaian bahan bakar *sawdust* dengan batu bara dengan cakupan efisiensi boiler, kebutuhan daya listrik, biaya untuk menentukan jenis bahan bakar yang tepat & berkelanjutan kedepannya, emisi gas buang dan agar dapat menambah rujukan untuk penelitian yang akan datang.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Batu Bara

Batu bara adalah batu sedimen organik yang mengandung karbon, hidrogen, nitrogen, oksigen, dan sulfur serta unsur-unsur lain dalam jumlah yang bervariasi. Batu bara mengandung material karbon lebih dari 50% dalam basis massa dan lebih dari 70% dalam basis volume (University of Kentucky, 2024). Batu bara sangat populer

digunakan untuk pembangkitan listrik dan berkontribusi sebanyak 40% produksi listrik dunia. Saat ini cadangan batu bara di bumi diperkirakan masih cukup untuk kurang lebih 300 tahun penggunaan (Otto. C. Kopp, 2024).

Batu bara merupakan batu karbon yang keras, getas, dan mudah terbakar yang terbentuk dari proses dekomposisi dan perubahan vegetasi akibat kompaksi, temperatur, dan tekanan selama masa pembentukannya (*University of Kentucky*, 2024). Sumber vegetasi batu bara berasal dari lumut atau tanaman rendah lainnya atau gambut. Proses pembentukan batu bara disebut *coalification* yang melibatkan perubahan kimia dan fisik pada senyawa organik dan anorganik. Proses *coalification* terus berlanjut hingga batu bara mencapai rank atau peringkat akibat pemanasan tertinggi yang terjadi sepanjang sejarah penguburan. Ketika batu bara sudah mencapai peringkat tertentu, prosesnya tidak dapat dibalikkan.

Berdasarkan *rank* atau peringkat umumnya batu bara dibagi menjadi empat dengan urutan terendah ke tertinggi adalah *lignite*, *sub-bituminous*, *bituminous*, dan *anthracite*. Setiap *rank* memiliki sifat fisik dan kimia, kandungan unsur dan senyawa, serta nilai kalor yang berbeda. Perbedaan keempat rank batu bara dirangkum pada Gambar 2.1.

Peat	Low-rank coal					Medium-rank coal					High-rank coal			Method for determining rank (dmmf) (U.S. ASTM)	
	Lignite		Sub-bituminous			Bituminous					Anthracitic				
						high volatile C	high volatile B	high volatile A	medium volatile	low volatile	Semi-anthracite	Anthracite	Meta-anthracite		
	A	B	C	8,300	9,500										10,500
	B	A												Calorific value (Btu/lb.)	
	5,000	6,300	8,300	9,500	10,500	11,500	13,000	14,000							
			Less distinct for changing rank						31	22	14	8	2	~0	Volatile matter (%)
			Less distinct for changing rank						69	78	86	92	98	~100	Fixed Carbon (%)

Gambar 2.1 Rank batu bara (*University of Kentucky*, 2024)

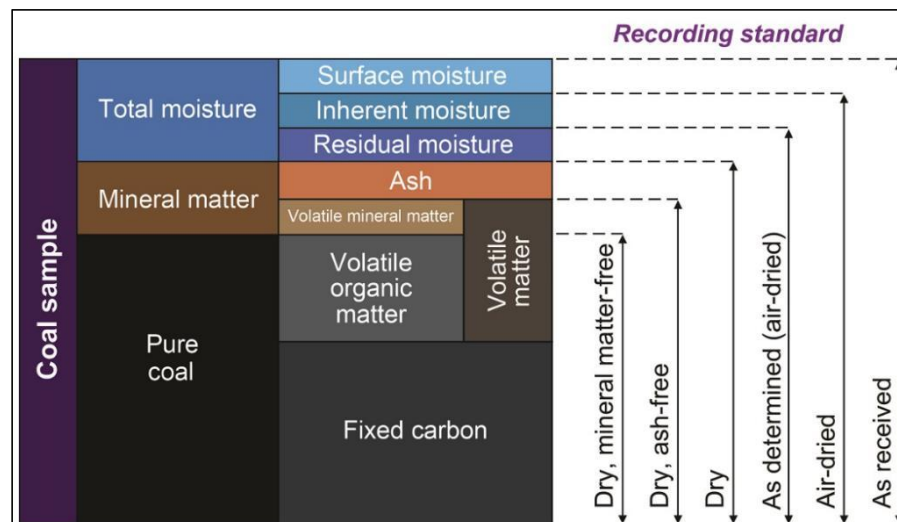
Batu bara sangat heterogen di alam, artinya batu bara yang berasal dari sumber berdekatan mungkin memiliki komposisi dan sifat yang sangat berbeda, dan berdasarkan alasan tersebut diperlukan beberapa teknik analisis dalam karakterisasi untuk secara akurat memprediksi sifat batu bara ketika digunakan contohnya untuk

pembakaran. Beberapa standar digunakan dalam analisis batu bara yang mengatur metode dan prosedur pengujian seperti *ISO Standard*, *ASTM International*, *British Standard*, *Chinese Coal Standard*, *Indian Standard*, *South African National Standard*, dan *Australian Standard* (Q. Zhu, 2014).

Analisis karakteristik batu bara umumnya dilakukan *off-site* dengan tujuan utama menentukan kualitas atau rank dari batu bara sehingga dapat menjadi dasar dalam penjualan maupun penggunaan batu bara. Secara umum, analisis dan pengujian batu bara terdiri atas:

1. *Proximate analysis* (analisis *proximate*)
2. *Ultimate analysis* (analisis *ultimate*)
3. *Ash analysis* (analisis abu)
4. *Calorific value* (nilai kalor)

Dalam melaporkan analisis batu bara, basis yang berbeda dapat digunakan bergantung pada kandungan moisture dan ash. Standar basis analisis batu bara dapat dikonversi ke basis lain untuk pelaporan. Basis pelaporan penting untuk dipahami guna memperoleh korelasi yang benar terhadap parameter atau penggunaan dalam persamaan. Gambar 2.2 merupakan variasi basis untuk analisis komponen batu bara dengan penjelasan sebagai berikut (A. R. Gbadamosi dkk, 2020):



Gambar 2.2 Standar atau basis analisis batu bara (A. R. Gbadamosi dkk, 2020)

1. *As received basis* (ar atau AR), menunjukkan data atau hasil dihitung terhadap kondisi kelembaban sampel batu bara ketika sampai di fasilitas pengujian.
2. *Air-dried* (ad atau AD), menunjukkan data atau hasil dihitung terhadap kondisi kelembaban batu bara setelah mengalami pengeringan oleh udara pada kelembaban ruang.
3. *As determined* (adm atau ADM), menunjukkan data atau hasil dihitung terhadap kondisi kelembaban batu bara setelah mengalami pengeringan, tetapi masih mengandung *moisture* yang disebut *residual moisture*.
4. *Dry*, menunjukkan data atau hasil dihitung dengan asumsi teoretis sampel batu bara tidak mengandung *moisture*. Basis ini umumnya digunakan di fasilitas pengujian.
5. *Dry ash-free* (daf atau DAF), menunjukkan data atau hasil dihitung dengan asumsi teoretikal sampel batu bara tidak mengandung *moisture* dan *ash* (batu bara hanya mengandung *volatile matter* dan *fixed carbon*).
6. *Dry mineral matter-free* (dmmf atau DMMF), menunjukkan data atau hasil dihitung dengan asumsi teoretis sampel batu bara tidak mengandung mineral.

A. Proximate Analysis

Analisis *proximate* menentukan kandungan *moisture* (air), *volatile matter* (VM), *fixed carbon* (FC), dan *ash* (abu). Metode analisis ini merupakan metode paling sederhana dan paling umum dalam evaluasi batu bara.

1. Moisture

Kelembaban atau kandungan air pada batu bara memiliki beberapa bentuk yakni:

- a. *Surface atau free moisture*: air yang terkandung pada permukaan partikel batu bara.
- b. *Inherent (residual moisture)*: air yang terkandung dalam pori-pori atau kapilaritas batu bara.
- c. *Decomposition moisture*: air yang dihasilkan dari dekomposisi termal penyusun organik batu bara.

- d. *Mineral moisture*: air yang terdiri dari bagian struktur kristal silikat hidro seperti tanah liat dan mineral anorganik dalam batu bara.

Terdapat beberapa standar pengujian untuk menentukan kandungan air batu bara dan diklasifikasikan terhadap tipe kelembaban yang diuji:

- a. *Equilibrium moisture*.
- b. *Total moisture*: terdiri atas *surface* dan *inherent moisture* dalam persentase massa dan *as-received basis*.
- c. *Moisture in air dried sample (residual moisture)*.

2. *Volatile matter* (VM)

Volatile matter dalam batu bara merujuk pada produk dekomposisi termal ketika batu bara dipanaskan hingga temperatur tinggi tanpa adanya oksigen. *Volatile matter* yang diperoleh selama pirolisis batu bara terdiri atas gas mudah terbakar seperti hidrogen, karbon monoksida, hidrokarbon, tar, amonia, serta gas tidak mudah terbakar seperti karbon dioksida dan uap air (Q. Zhu, 2014). Kandungan *volatile matter* dapat digunakan untuk menetapkan rank batu bara dan karakteristik pembakaran seperti kemampuan batu bara untuk terbakar (*combustibility*), kemudahan untuk dipantik (*ease of ignition*), dan kestabilan api (*flame stability*). Dengan kandungan *volatile matter* yang tinggi, maka batu bara memerlukan temperatur nyala (*ignition temperature*) yang lebih rendah, makin mudah untuk terbakar, dan makin cepat untuk menyebarkan api (D. Sha dkk, 2021). Sebaliknya, untuk kandungan *volatile matter* yang rendah, laju konsumsi oksigen dan intensitas pelepasan panas akan lebih rendah, serta lebih sulit untuk terbakar.

3. *Ash*

Ash atau abu adalah residu yang tersisa setelah pembakaran batu bara dan berasal dari kompleks anorganik dalam batu bara. Abu yang dihasilkan dijadikan indikasi mutu atau kualitas suatu batu bara karena memberikan ukuran material yang tidak dapat terbakar. Kandungan abu yang tinggi akan meningkatkan waktu pembakaran batu bara karena keberadaan lapisan abu. Hal ini akan menyebabkan laju difusi oksigen dan laju pembakaran akan berkurang sehingga mengurangi efisiensi pembakaran (S. Jayanti, 2007).

4. *Fixed carbon* (FC)

Fixed carbon dalam batu bara adalah karbon yang tersisa setelah semua volatile matter dilepaskan (D. K. Sarkar, 2015). *Fixed carbon* berbeda dengan kandungan karbon *ultimate analysis* karena ada beberapa karbon yang hilang dalam hidrokarbon dengan *volatiles*. Penentuan *fixed carbon* dihitung dengan mengurangi dari 100 hasil penjumlahan moisture, *volatile matter*, dan *ash* dalam persentase massa berdasarkan acuan/ basis kadar moisture yang sama (B. Mazumder, 2012). Kandungan *fixed carbon* meningkat seiring peningkatan rank batu bara. Kandungan *fixed carbon* yang tinggi menunjukkan nilai kalor yang lebih tinggi.

Rasio *fixed carbon* terhadap *volatile matter* disebut rasio kualitas bahan bakar, digunakan untuk mengukur reaktivitas pembakaran dan *burnout* (S. Aich, 2020). *Fixed carbon* merupakan parameter penting dalam menentukan kestabilan proses pembakaran. *Fixed carbon* yang lebih tinggi atau dalam kata lain rasio bahan bakar lebih tinggi membuat batu bara semakin sulit dibakar, tetapi membuat proses pembakaran lebih stabil. Rasio bahan bakar yang rendah memiliki efek pada sifat pembakaran yang tinggi dan dapat memicu penyalaan batu bara secara spontan selama *stockpiling* atau *handling*.

B. *Ultimate Analysis*

Analisis *ultimate* menentukan fraksi persentase massa dari penyusun utama batu bara seperti karbon, hidrogen, nitrogen, sulfur dan oksigen. Analisis *ultimate* digunakan bersama dengan nilai kalori untuk melakukan perhitungan pembakaran seperti laju umpan batu bara, performa boiler, dan emisi sulfur.

1. Karbon dan hidrogen

Karbon dan hidrogen masing-masing menyumbang 70-95% dan 2-6% dalam berat (daf) dari bahan organik batu bara (J. G. Speigh, 2005). Hampir semua karbon dan hidrogen batu bara ada dalam bentuk gabungan dalam senyawa organik kompleks yang membentuk batu bara. Selain itu, karbon juga ada dalam mineral karbonat dan hidrogen ada dalam berbagai bentuk *moisture*.

2. Nitrogen

Nitrogen menyumbang persentase berat yang kecil dalam batu bara. Kandungan nitrogen batu bara dapat berasal dari protein tumbuhan dan hewan yang cukup stabil selama proses *coalification*.

3. Sulfur

Sulfur yang ada dalam batu bara mempunyai tiga bentuk utama yakni sulfat inorganik atau mineral sulfat, mineral sulfid, dan sulfur organik. Sulfur menjadi parameter penting karena dampak lingkungan dari emisi SO₂ berkaitan langsung dengan kandungan sulfur dalam batu bara.

4. Oksigen

Oksigen yang ada dalam batu bara dapat berbentuk organik dan inorganik. Dalam bentuk organik, oksigen ada dalam hidroksil, grup fenol, grup karboksil, grup metoksil, dan grup karbonil. Dalam bentuk inorganik, oksigen ada dalam berbagai bentuk *moisture*, silikat, karbonat, oksida, dan sulfat. Persentase oksigen dihitung dengan mengurangi 100 dari jumlah karbon, hidrogen, nitrogen, dan sulfur (J. G. Speigh, 2005).

C. Ash Analysis

Ketika batu bara dibakar, mineral penyusunnya membentuk residu abu yang terdiri dari oksida silikon, aluminium, besi, kalsium, magnesium, titanium, mangan, sodium, dan kalium, sebagian digabungkan sebagai silikat, sulfat, dan fosfat. Analisis abu sering kali berguna dalam menggambarkan keseluruhan kualitas batu bara karena komposisi mineral batu bara sering didekati dengan menganalisis komposisi kimia abu batu bara. Komposisi abu penting diketahui untuk memprediksi perilaku abu dan slag pada ruang bakar, serta pertimbangan pemanfaatan abu hasil pembakaran.

D. Calorific Value

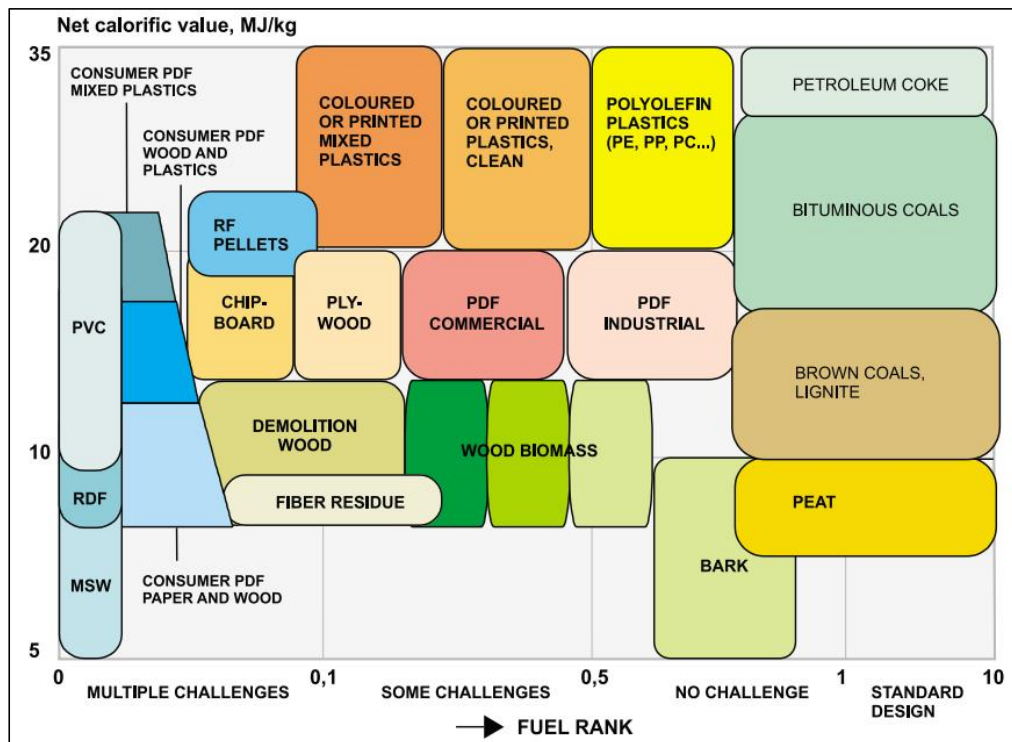
Nilai kalor menunjukkan kandungan panas atau nilai energi batu bara. Nilai kalor menjadi parameter penting dalam pembakaran batu bara dan menjadi tolak ukur kualitas batu bara yang paling umum digunakan dan juga nilai ekonominya. Nilai kalor biasanya dinyatakan dalam *gross calorific value (higher heating value - HHV)* atau *net calorific value (lower heating value - LHV)*. Perbedaan dari kedua nilai tersebut adalah nilai HHV diperoleh dengan asumsi semua uap air yang dihasilkan dari pembakaran

batu bara mengalami kondensasi, sedangkan LHV mengasumsikan uap air yang dilepaskan tidak mengalami kondensasi.

2.2.2 Jenis-Jenis Biomassa

biomassa adalah bahan bakar alternatif yang bisa digunakan untuk *co-firing*. Jika dikelola dengan baik dan benar, biomassa memberikan banyak manfaat, paling utama sebagai sumber energi baru dan terbarukan. biomassa dapat dengan mudah ditanam di berbagai kondisi lingkungan. Umumnya biomassa yang berasal dari hutan khusus tanaman energi atau sisa-sisa industri minyak kelapa maupun kayu digunakan sebagai substitusi batu bara melalui *co-firing*. Produk sisa seperti serbuk kayu, palet kayu, atau sampah sisa produk agrikultur merupakan sumber paling murah untuk energi biomassa. biomassa tersusun dari unsur organik maupun anorganik dengan kandungan utama karbon, hidrogen, dan oksigen. Selain itu, biomassa juga mengandung nitrogen, klorin, besi, dan logam alkali (S. V. Vassilev, 2012).

Karakteristik biomassa sangat berbeda dibandingkan batu bara. Kandungan *volatile matter* di biomassa basis kayu umumnya mendekati 80% (K. Veijonen, 2003), sementara di batu bara hanya sekitar 30%. Kandungan nitrogen dan sulfur pada biomassa jenis kayu lebih rendah dari batu bara. Selanjutnya, perbedaan paling penting antara biomassa dan batu bara adalah nilai net kalori. Kandungan *moisture* yang tinggi pada biomassa mengakibatkan rendahnya nilai net kalori. Ukuran partikel biomassa juga lebih besar dibandingkan ukuran partikel batu bara. Massa jenis biomassa lebih rendah yakni sekitar 500-800 kg/m³ dibandingkan batu bara dengan nilai sekitar 1300-1400 kg/m³ (A. Demirba, 2003). Gambar 2.3 menunjukkan perbandingan nilai net kalori dari berbagai jenis bahan bakar padat fosil dan biomassa serta tingkatan tantangan dalam penggunaannya.



Gambar 2.3 Perbandingan nilai kalor dan kemudahan aplikasi dari macam-macam bahan bakar padat (K. Veijonen, 2003)

Saat ini pemerintah berupaya untuk meningkatkan bauran energi baru dan terbarukan untuk mengurangi pemakaian energi fosil yang memiliki dampak buruk untuk lingkungan. Salah satu upaya yang dilakukan adalah dengan memanfaatkan energi dari biomassa. Salah satu kelebihan pemanfaatan energi biomassa adalah CO₂ yang dihasilkan dari proses pembakaran memiliki siklus yang lebih pendek dibandingkan dengan yang dihasilkan dari energi fosil sehingga tidak mempengaruhi kesetimbangan CO₂ di atmosfer (L. Parinduri, 2020). Saat ini beberapa jenis biomassa yang secara umum banyak dimanfaatkan untuk *co-firing* antara lain sekam padi, *refuse derived fuel* (RDF), *solid recovered fuel* (SRF), cangkang sawit, tandan kosong, *sawdust* dan *wood pellet*.

A. Sekam Padi

Sekam padi memiliki potensi yang cukup besar dikarenakan banyaknya area persawahan di Indonesia. Berdasarkan data badan pusat statistik, luas area sawah dan produksi padi di Indonesia pada tahun 2020 sebesar 10,66 juta hektar dan 54,65 juta ton. Jumlah sekam padi yang didapat dari gabah kering giling (GKG) adalah sekitar 20%

dari total berat GKG (Badan Pusat Statistik, 2021). Dengan melakukan campuran sekam padi pada proses pembakaran tentunya memberikan dampak kepada performa peralatan di PLTU. Dalam sebuah penelitian yang dilakukan pada PLTU dengan jenis *pulverized coal* berkapasitas 400 MW menggunakan sekam padi ditemukan adanya penurunan efisiensi boiler sebesar 3,19% dan menurunkan daya mampu *gross* sebesar 2,53% dikarenakan nilai GCV dari sekam padi cenderung lebih rendah dibandingkan dengan batu bara (N. Cahyo dkk, 2022).

B. RDF dan SRF

Refuse Drive Fuel (RDF) adalah bahan bakar alternatif yang dihasilkan dari bermacam – macam limbah padat, limbah industri dan limbah komersial. Tahapan proses yang dilakukan antara lain pemisahan, pengaturan ukuran, pengeringan dan pemisahan (B. Wahyu dkk, 2024). Berdasarkan standar ASTM E856-83, RDF dikelompokkan menjadi tujuh kategori (G. L. Tihin, 2023), seperti pada Tabel 2.2 berikut:

Tabel 2.2 Klasifikasi *Refuse Drive Fuel*

Kategori	Deskripsi
RDF – 1	Bahan bakar yang diperoleh dari berbagai jenis <i>Municipal Solid Waste</i> , sebagian besar terdiri dari bahan yang mudah terbakar. Contoh: plastik, kertas, karton
RDF – 2	Limbah yang diproses menjadi partikel kasar dengan atau tanpa menghilangkan kandungan logam dan kaca dan kemudian disaring menggunakan saringan berukuran 6 inch.
RDF - 3	Bahan bakar yang berasal dari MSW yang dipisahkan kandungan logam, kaca dan bahan anorganik lainnya yang dapat melewati saringan berukuran 2 inch.
RDF – 4	Limbah yang dapat dibakar dan diolah menjadi serbuk, dan 95% beratnya dapat melewati saringan berukuran 10 mesh.
RDF - 5	Limbah yang dapat dibakar dan kemudian dipadatkan menjadi bentuk pelet, slugs dan briket.
RDF – 6	Bahan bakar RDF dalam bentuk cair.
RDF - 7	Bahan bakar RDF dalam bentuk gas.

Solid Recovered Fuel (SRF) adalah bahan bakar yang berasal dari limbah yang memenuhi standar dan spesifikasi kualitas yang lebih ketat. SRF telah melalui proses tambahan untuk meningkatkan kualitasnya. SRF memiliki nilai kalor lebih tinggi dan kadar air yang lebih rendah dibandingkan dengan RDF. Pada umumnya 40% - 50% dari nilai MSW dapat dikonversikan menjadi RDF (*Final Report Biomass Cofiring*, 2022). Pada Tabel 2.3 dapat dilihat perbedaan karakteristik antara RDF dan SRF.

Tabel 2.3 *Physicochemical properties* dari RDF dan SRF

No.	Parameter	RDF	SRF
1	<i>Net calorific value, kKal/kg (As Received)</i>	1600 - 3800	3800 – 5700
2	<i>Moisture content, wt%</i>	18 - 50	5 - 18
3	<i>Ash content, wt%</i>	5 - 20	< 10
4	<i>Other heavy metal, mg/kg</i>	< 850	< 450
5	<i>Chlorine, wt%</i>	< 3	< 1
6	<i>Particle size, mesh</i>	< 10	< 20

Beberapa tantangan yang mungkin ditemukan dalam hal implementasi RDF dan SRF sebagai energi alternatif antara lain meliputi investasi peralatan yang digunakan dalam pengolahan, pemilihan komponen MSW, penggilingan dan penyaringan agar dapat memenuhi standar RDF dan SRF.

C. *Sawdust* dan *Wood Pellet*

Sawdust atau serbuk gergaji merupakan biomassa yang didapatkan dari sisa proses produksi pengolahan kayu. Secara total, produksi kayu di provinsi Banten pada tahun 2023 sebesar 148.782,66 m³ (Badan Pusat Statistik Provinsi Banten, 2023). Potensi produksi pengolahan kayu di provinsi Banten dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Produksi kayu provinsi Banten
(Badan Pusat Statistik Provinsi Banten, 2023)

Tahun produksi	Kayu hutan - kayu bulat perum perhutani (m ³)	Kayu hutan - jumlah kayu bulat (m ³)	Kayu hutan - kayu gergajian (m ³)	Kayu hutan - kayu lapis (m ³)	Total (m ³)
2023	25598	25598	7333,09	90253,57	148782,66

Jenis kayu yang pada umumnya digunakan sebagai bahan mentah *wood pellet* ataupun *wood chip* antara lain adalah jenis akasia, kaliandra, gamal dan turi. Pada kasus *pellet* biomassa bahan baku yang dapat digunakan mencakup *sawdust*, kayu gelondongan, ranting dan sisa – sisa kayu lainnya. Nilai karakteristik yang didapatkan dari *sawdust* ataupun *wood pellet* tergantung dari jenis kayu yang digunakan, pada umumnya nilai kalori yang didapatkan dari kayu hutan tropis sekitar 4.015 – 4.273 kkal/kg (*Final Report Biomass Cofiring*, 2022). Nilai kalori dari jenis – jenis kayu sebagai bahan bakar biomassa dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Nilai kalori dari jenis kayu

No.	Jenis kayu	Nilai kalori (kkal/kg)
1	Akasia	4.254 - 4.462
2	Kaliandra	4.600
3	Gamal	4.168
4	Turi	3.965 - 4.548

D. Kelapa Sawit

Indonesia merupakan salah satu penghasil sawit terbesar di dunia. Penyebaran kelapa sawit hampir di seluruh penjuru tanah air. Dalam prosesnya, tanaman kelapa sawit menghasilkan limbah sisa pengolahan dalam bentuk cangkang sawit (*palm kernel shell*), tandan kosong (*empty fruit bunch*) dan serat sawit (*fiber*). Dari setiap ton kelapa sawit yang diproses menjadi *crude palm oil* menghasilkan limbah padat dengan rincian 15% serat sawit (*fiber*), 22% tandan kosong (EFB) dan 7% cangkang sawit (PKS) (T. A. Kurniawan, 2025).

Cangkang sawit dikenal sebagai bahan bakar alternatif yang berkualitas, beberapa keunggulan cangkang sawit antara lain ukuran yang relatif seragam, mudah dihancurkan, serta nilai kalor yang lebih tinggi. Di sisi lain, cangkang sawit memiliki beberapa tantangan dalam pemanfaatannya, salah satunya adalah perlunya *pre-treatment* seperti *torrefaction* dan *pelletized* sebelum bisa dimanfaatkan sebagai bahan bakar.

Saat ini salah satu tantangan dalam pemanfaatan cangkang sawit adalah kontinyuitas pasokan dari perusahaan kelapa sawit mengingat nilai jual ekspor

cangkang sawit lebih besar dibandingkan bila dijual ke PLN sebagai bahan bakar alternatif.

E. Karakteristik dan Potensi Penggunaan *Sawdust* di Provinsi Banten

Dari beberapa jenis biomassa yang berpotensi dan tersedia cukup banyak di Provinsi Banten yang dapat digunakan sebagai bahan campuran bahan bakar PLTU untuk *co-firing* yaitu jenis *sawdust*. Provinsi Banten memiliki aktivitas industri kayu, penggergajian, dan pabrik briket/ *sawdust* yang menunjukkan ketersediaan limbah serbuk gergaji yang cukup banyak, contoh titik produksi: Kramatwatu (Serang) dan Pasar Kemis (Tangerang). Berikut salah satu contoh hasil uji laboratorium *sawdust sample* bahan bakar biomassa yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Hasil uji laboratorium *sawdust sample* bahan bakar biomassa
(Sucofindo UP Suralaya, 2024)

Parameter	Hasil			Satuan
	ARB	ADB	DB	
<i>Total Moisture</i>	39,92	-	-	%
<i>Moisture in Analysis</i>	-	14,46	-	%
<i>Gross Calorific Value</i>	3004	4185	4950	Kcal/Kg
<i>Size Distribution</i>				
- Retained mesh 5 mm		9,18		%
- Retained mesh 2,38 mm		43,65		%
- Passing mesh 2,38 mm		56,35		%

Keterangan:

ARB: As-Received Basis

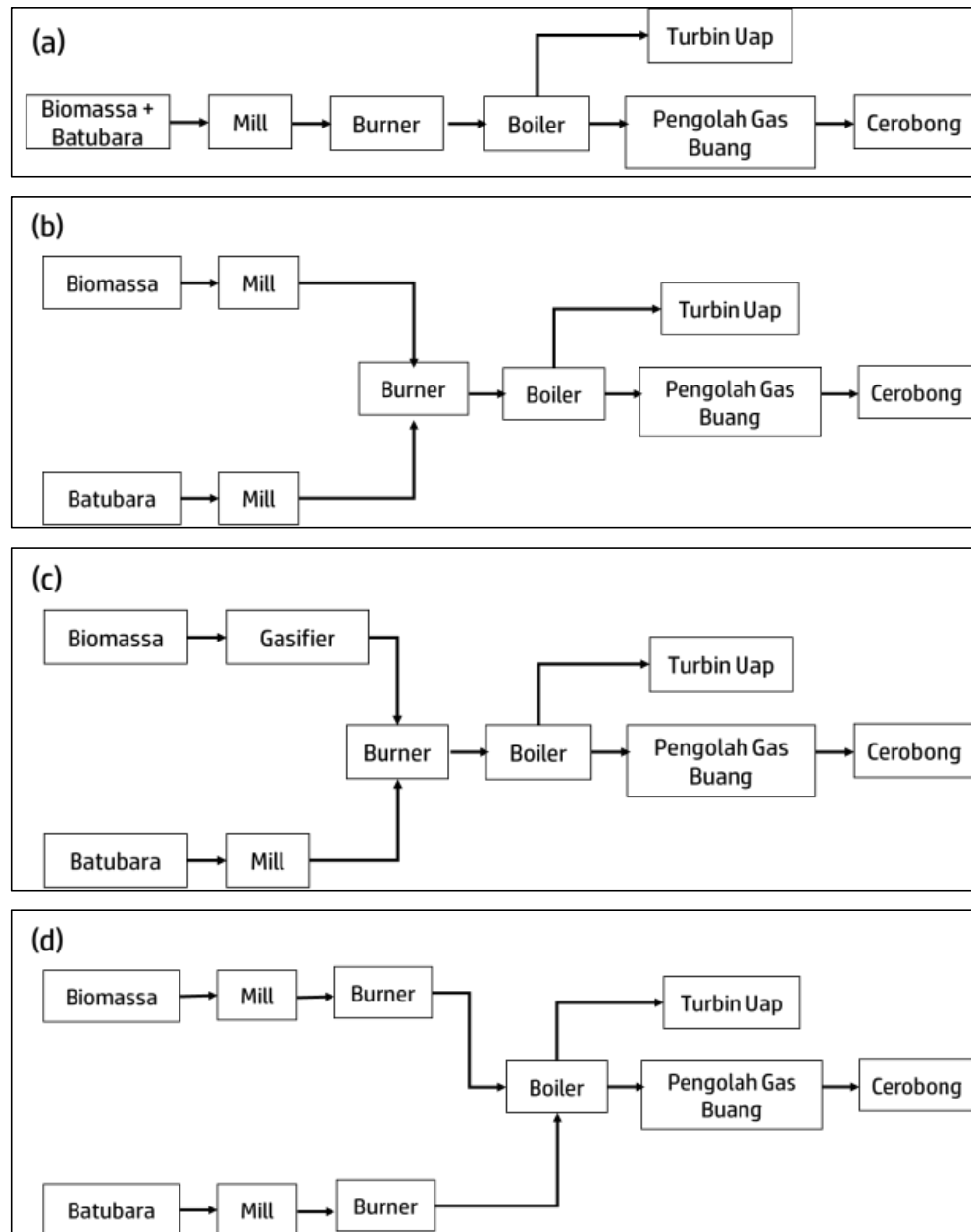
ADB: As-Determined Basis

DB: Dry Basis

2.2.3 *Co-firing*

Co-firing merupakan suatu proses pembakaran dua material yang berbeda secara bersamaan. *Co-firing* pada boiler pada umumnya memanfaatkan bahan bakar biomassa sebagai salah satu material bahan bakarnya. *Co-firing* biomassa merupakan metode dengan biaya yang rendah untuk menciptakan energi yang ramah lingkungan (Milićević, A. dkk, 2021). Gambar 2.4 menunjukkan beberapa metode *co-firing* yang dapat dilakukan. Pada *co-firing* batu bara dan biomassa, variasi persentase biomassa

yang diperbolehkan umumnya sekitar 5% untuk mencegah modifikasi yang signifikan pada pembangkit yang sudah ada, yang berimplikasi pada tidak adanya tambahan biaya investasi yang dibutuhkan (Z. Arifin dkk, 2023). Persentase biomassa dapat ditingkatkan, tetapi memerlukan beberapa modifikasi atau pengembangan dari alat-alat yang sudah ada.



Gambar 2.4 Skema jenis teknologi *co-firing* (a) *direct co-firing* dengan *mill* yang sama (b) *direct co-firing* dengan *mill* terpisah (c) *indirect co-firing* (d) *parallel cofiring* (E. Agbor dkk, 2014)

A. *Direct co-firing*

Metode *direct co-firing* mencampur batu bara dan biomassa untuk dibakar pada boiler yang sama seperti pada Gambar 2.4 (a). biomassa dapat digiling pada *mill* yang sama dengan batu bara atau terpisah seperti pada Gambar 2.4 (b) bergantung pada jenis biomassa yang digunakan dan sifat-sifat bahan bakar yang dimiliki. Cara ini merupakan cara yang paling sederhana dalam melakukan pencampuran sehingga memerlukan biaya investasi yang rendah. Metode ini telah diterapkan secara luas untuk biomassa baik dalam bentuk cacahan, pellet atau serbuk, umumnya diimplementasikan pada rasio *co-firing* yang relatif rendah.

B. *Indirect co-firing*

Metode *indirect co-firing* dilakukan berdasarkan proses gasifikasi biomassa dengan bahan bakar gas, hasil gasifikasi digunakan untuk pembakaran di tungku ruang bakar batubara seperti pada Gambar 2.4 (c) menunjukkan skema dari metode *indirect co-firing* yang bisa dilakukan di boiler batu bara dengan tambahan alat gasifier sebagai *pre-treatment* untuk biomassa. Produk utama dari proses gasifikasi adalah bahan bakar gas dengan nilai kalori cenderung rendah tergantung terutama pada kandungan air dari biomassa.

C. *Parallel co-firing*

Metode *parallel co-firing* gambar 2.4 (d) menunjukkan skema instalasi untuk produksi uap dari boiler berbahan bakar batu bara dan biomassa. masing – masing bahan bakar dibakar pada burner yang berbeda dan uap hasil produksi dari boiler digabungkan bersama untuk digunakan pada proses lanjut. Metode ini memerlukan biaya investasi yang paling tinggi (M. V. Gil dkk, 2019).

Dari ketiga metode di atas, *direct co-firing* menjadi opsi paling mudah, cepat, dan murah untuk melakukan *co-firing* karena hanya perlu menambahkan *nozzle* untuk biomassa pada *burner* boiler yang sudah ada. Namun, metode ini memiliki risiko penurunan performa boiler yang lebih tinggi dibandingkan kedua metode lainnya dan hanya bisa menggunakan persentase biomassa yang kecil sekitar 5-10%. Sedangkan, pada metode *parallel* dan *indirect co-firing* persentase biomassa yang lebih tinggi dapat digunakan.

Dalam mengimplementasikan *co-firing*, pencampuran dua bahan bakar yang berbeda, sifat dan kandungan bahan bakar campuran juga akan berbeda. Dalam kasus pencampuran batu bara dan biomassa yang keduanya merupakan bahan bakar padat, maka dapat digunakan asumsi tidak adanya reaksi antara biomassa dan batu bara selama pencampuran atau *nonreacting mixtures* (M. J. Moran, 2018), sehingga sifat dan kandungan akhir campuran merupakan penjumlahan dari fraksi massa dikali dengan nilai kandungan masing-masing bahan bakar yang dirumuskan sebagai berikut:

$$P_{campuran} = (wt\% \times P)_{biomassa} + (wt\% \times P)_{batubara} \quad (2.1)$$

Dengan P adalah sifat atau kandungan dari bahan bakar.

2.2.4 Overview Co-firing di Indonesia

Pemerintah saat ini mendorong implementasi *co-firing* di Indonesia dalam upaya mencapai target bauran energi baru dan terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025.

Pada akhir tahun 2020, PLN telah melakukan uji coba *co-firing* PLTU Batu Bara dengan biomassa di 34 pembangkit. Dari 34 unit pembangkit tersebut 6 diantaranya sudah beroperasi secara komersil antara lain PLTU Paiton, PLTU Pacitan, PLTU Suralaya, PLTU Jeranjang, PLTU Ketapang dan PLTU Sanggau (*Final Report Biomass Cofiring*, 2022). Sampai dengan saat ini total sebanyak 114 unit pembangkit listrik batu bara yang memiliki potensi untuk dilakukannya *co-firing* biomassa yang tersebar di 52 lokasi yang secara lebih rinci dapat dilihat pada Tabel 2.7 (A. Sugiyono, 2022).

Tabel 2.7 Target implementasi *co-firing* di Indonesia (A. Sugiyono, 2022)

Tipe boiler	Jumlah target	Jenis biomassa, % <i>co-firing</i>
<i>Pulvarized Coal</i>	19	<i>Sawdust</i> <5%, <i>rice husk</i> <1%, <i>woodpellet</i> <5%, <i>RDF water hyacinth</i> 1%
<i>Fluidized Bed</i>	19	<i>SRF</i> <3%, <i>palm shells</i> <5%, <i>woodchip</i> <5%, <i>sawdust</i> 5%
<i>Stoker</i>	14	<i>palm shells</i> <15%, <i>woodpellet</i> <15%, <i>woodchip</i> <20%, <i>coconut shell</i> <5%

Karakteristik biomassa yang relatif memiliki nilai *moisture* lebih tinggi berpotensi menurunkan temperatur gas pembakaran karena sebagian energi digunakan untuk menguapkan air yang terkandung di dalam bahan bakar. Implementasi *co-firing* juga berpotensi dapat menurunkan daya mampu dari turbin uap sampai dengan 8,6% akibat proses pembakaran menggunakan biomassa (M. Soleh dkk, 2023).

2.2.5 Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Emisi yang dihasilkan oleh pembangkit listrik Tenaga Uap perlu dikaji sesuai standar, dimana penggunaan *sawdust* oleh *co-firing* dengan batubara dapat disesuaikan berdasar peraturan pemerintah Republik Indonesia terdapat pada Nomor p.15/menlhk/setjen/kum.1/4/2019. Adapun baku mutu emisi yang dihasilkan oleh Pembangkit PLTU yang dibangun atau beroperasi sebelum dan sesudah adanya Peraturan Menteri, yakni dapat dilihat pada tabel 2.8 dibawah ini:

Tabel 2.8 Baku mutu emisi PLTU sebelum & sesudah Peraturan Menteri
(Nomor p.15/menlhk/setjen/kum.1/4/2019)

Parameter	Kadar maksimum emisi					
	Dibangun atau beroperasi sebelum Peraturan Menteri			Dibangun setelah Peraturan Menteri		
	Batu bara (mg/Nm ³)	Minyak solar (mg/Nm ³)	Gas (mg/Nm ³)	Batu bara (mg/Nm ³)	Minyak solar (mg/Nm ³)	Gas (mg/Nm ³)
Sulfur dioksida (SO ₂)	550	650	50	200	350	25
Nitrogen dioksida (NOX)	550	750	320	200	250	100
Partikulat (PM)	100	75	30	50	30	10
Merkuri (Hg)	0,03	-	-	0,03	-	-

Tabel 2.8 diatas menjelaskan standar parameter kadar maksimum sulfur dioksida, nitrogendioksida, partikulat dan merkuri yang dihasilkan oleh bahan bakar batubara, minyak solar dan gas dari Pembangkit PLTU yang dibangun atau beroperasi sebelum dan yang dibangun sesudah adanya Peraturan Menteri berlaku.

Pada sistem tenaga listrik terdapat dua variabel yang bisa diatur secara bebas atau variabel pengatur (*control variabel*), yaitu daya nyata *Mega Watt* (MW) dan daya reaktif (MVAR) (Kundur, P.,1994). Pengaturan daya nyata dapat mempengaruhi frekuensi dan jumlah konsumsi bahan bakar, pengaturan daya reaktif dapat mempengaruhi tegangan dan arus seksitasi (fluksi). Terjadinya arus seksitasi dimana beban naik maka daya belawan generator semakin besar sehingga putaran generator akan menurun, begitu juga dengan tegangan. Maka terjadi putaran turbin ikut turun, oleh karena itu diperlukan lebih banyak jumlah uap yang dihasilkan untuk menaikkan putaran turbin dengan pasokan bahan bakar harus ditambah sehingga produksi uap pada pembangkit bertambah, sehingga nilai frekuensi tetap normal dan stabil. Perubahan beban akan mengurangi produksi bahan bakar sehingga uap yang dihasilkan bisa disesuaikan dengan beban yang dibutuhkan maka uap yang sisah dihasilkan oleh turbin tidak terbuang ke udara. Upaya Pengurangan produksi dilakukan dengan mematikan nyala api dalam ruang ketel, nyala api dalam ruang bakar (ketel) sudah padam, masih banyak panas yang sisa dan menghasilkan uap sehingga pompa pengisian ketel harus tetap bekeja mengisi air ke dalam ketel, sehingga level air dalam drum masih stabil. Proses produksi uap dan masalah pemuain pada turbin pada pembangkit PLTU tidak dioperasikan terhadap perubahan beban besar untuk mengurangi efisiensi bahan bakar, emisi dan daya untuk menentukan ekonomi PLTU tidak menggunakan *re-heater* dan pemanas awal (Nag, P. K., 2018). Efisiensi pada boiler dapat dianalisis berdasar persamaan dibawah ini.

$$\eta_B = \frac{\Sigma \text{Kalor yang keluar boiler}}{\Sigma \text{Kalor yang masuk boiler}} \times 100\% \quad (2.2)$$

$$\eta_B = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \times 100\% = \frac{(m_{MS.h_1}) - (m_{FFW.h_2})}{m_{f.HHV_{batu\ bar\ a}}} \times 100\%$$

Dimana:

η_B = Efisiensi boiler (%)

m_{MS} = Laju aliran main steam (kg/s)

h_1 = Entalpi main steam (j/kg)

m_{FFW} = Laju aliran final feed water (kg/s)

h_2 = Entalpi final feed water (j/kg)

m_f = Laju aliran bahan bakar batu bara (kg/s)

HHV = High heating value batu bara (J/kg)

Dimana penjelasan pada persamaan sebagai berikut:

a) Persamaan Energi Kalor pada *main steam* (Joule)

Energi kalor = main steam flow x entalpi

Dimana:

- *Main steam flow*, diperoleh langsung dari data ukur.
- *Entalpi*, diperoleh dari hubungan *main steam pressure* dan *main steam temperature* dengan menggunakan tabel uap.
- *Main steam pressure*, diperoleh langsung dari data ukur.
- *Main steam temperature*, diperoleh langsung dari data ukur.

b) Persamaan energi kalor pada *final feed water* (Joule)

Energi kalor = final feed water x entalpi

Dimana:

- *Final feed water*, diperoleh langsung dari data ukur.
- *Entalpi*, diperoleh dari hubungan antara *final feed water pressure* dan *final feed water temperature* dengan menggunakan tabel uap.
- *Final feed water pressure*, diperoleh langsung dari data ukur.
- *Final feed water temperature*, diperoleh langsung dari data ukur.

c) Persamaan energi kalor pada *super heater spray water* (Joule)

Energi kalor = superheater spray water flow x entalpi

Dimana:

- *Super heater spray water flow*, diperoleh langsung dari data ukur.
- *Entalpi*, diperoleh dari hubungan antara *super heater spray water pressure* dan *super heater spray water temperature* dengan menggunakan tabel uap.
- *Super heater spray water pressure*, diperoleh langsung dari data *pressure hot reheat* yang ditambah 3 kg/cm² yakni sebesar sekitar 32 kg/cm².

- *Super heater spray water temperature*, diperoleh langsung dari data ukur.

d) Persamaan perhitungan Q_{out} kondensor

$$Q_{out} = m_{con} \times C_p \times \Delta T \quad (2.3)$$

Keterangan:

Q_{out} = Kalor hilang di kondensor (MW)

M_{con} = Laju aliran kondensor (kg/s)

C_p = Kalor jenis air (J/kg°C)

ΔT = Perubahan suhu kondensor (°C)

e) Persamaan perhitungan efisiensi konversi energi *gross*

$$\eta_{KEG} = \frac{P_{out}(Gross)}{Q_{input}Siklus} \times 100\% \quad (2.4)$$

Keterangan:

η_{KEG} = Efisiensi konversi energi *gross* (%)

$P_{out}(Gross)$ = Output generator *gross* (MW)

$Q_{input}Siklus$ = Kalor keluaran dari boiler (MW)

f) Persamaan perhitungan efisiensi *gross*

$$\eta_{Gross} = \frac{\eta_B}{\eta_{KEG_B}} \times 100\% \quad (2.5)$$

Keterangan:

η_{Gross} = Efisiensi *gross* (%)

η_{KEG} = Efisiensi konversi energi *gross* (%)

η_B = Efisiensi boiler (%)

g) Persamaan perhitungan efisiensi konversi energi *netto*

$$\eta_{KEN} = \frac{P_{out}(Netto)}{Q_{input}Siklus} \times 100\% \quad (2.6)$$

Keterangan:

η_{KEN} = Efisiensi konversi energi *netto* (%)

$P_{out}(Netto)$ = Output generator *netto* (MW)

$Q_{input}Siklus$ = Kalor keluaran dari boiler (MW)

h) Persamaan perhitungan efisiensi *netto*

$$\eta_{Netto} = \frac{\eta_B}{\eta_{KEN_B}} \times 100\% \quad (2.7)$$

Keterangan:

$$\eta_{Netto} = \text{Efisiensi netto (\%)}$$

$$\eta_{KEN} = \text{Efisiensi konversi energi netto (\%)}$$

$$\eta_B = \text{Efisiensi boiler (\%)}$$

i) Perhitungan laju kalor dan efisiensi termal

Laju kalor *bruto*:

$$HR_B = \frac{M_f \times HHV}{P_{out_B}} \quad (2.8)$$

Laju kalor *netto*:

$$HR_N = \frac{M_f \times HHV}{P_{out_N}} \quad (2.9)$$

Efisiensi termal *bruto*:

$$\eta_{thB} = \frac{860}{HR_B} \times 100\% \quad (2.10)$$

Efisiensi termal *netto*:

$$\eta_{thN} = \frac{860}{HR_N} \times 100\% \quad (2.11)$$

Keterangan:

$$P_{out_B} = \text{Daya output gross generator (MWh)}$$

$$P_{out_N} = \text{Daya output netto generator (MWh)}$$

$$860 = \text{Konstanta}$$

Jadi efisiensi keseluruhan pada PLTU dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\text{Efisiensi } (\eta) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.12)$$

Dimana:

$$P_{out} = \text{Energi keluaran pada generator (Watt)}$$

$$P_{in} = \text{Energi masukan pada boiler (kkal/jam)}$$

Catatan:

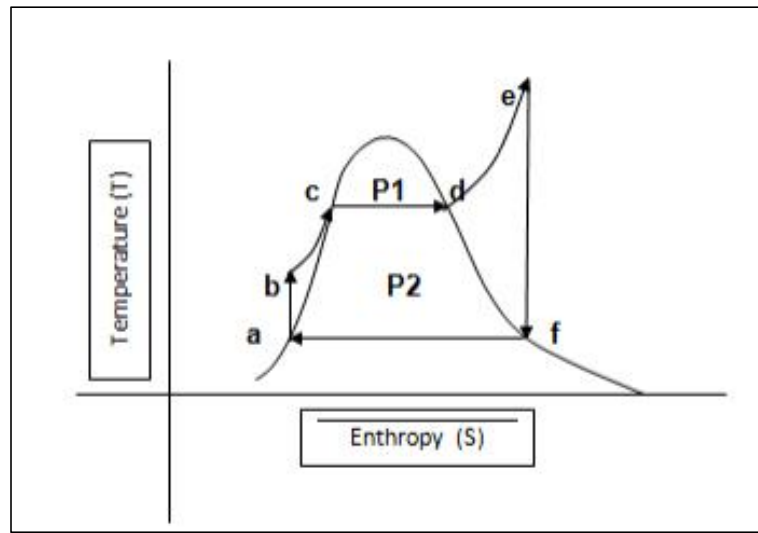
$$1 \text{ watt} = 1 \text{ joule/detik}$$

$$1 \text{ kkal} = 4186 \text{ joule}$$

$$1 \text{ joule} = 0,24 \text{ kal}$$

2.2.6 Siklus PLTU

Siklus PLTU *Rankine* ideal atau siklus pembangkit listrik tenaga uap adalah siklus teoritis paling sederhana dimana kandungan fluida yang dihasilkan oleh uap pada turbin sebagai media kerja seperti yang digunakan oleh pembangkit Listrik Tenaga Uap (M. J. Moran, H. N. Shapiro, D. D. Boettner, and M. B. Bailey, 2014) dapat dilihat pada gambar 2.5 dibawah ini:



Gambar 2.5 Siklus *Rankine*

(M. J. Moran, H. N. Shapiro, D. D. Boettner, and M. B. Bailey, 2014)

Pada gambar 2.5 diatas menjelaskan Siklus *Rankine* yang menjadi prinsip kerja suatu PLTU, dimana bentuk grafik yang dihasilkan oleh T-s (Temperatur – entropi) merupakan bentuk siklus tertutup adalah penerapan siklus *rankine*. Ada beberapa proses terjadinya siklus *rankine* pada pembangkit PLTU diantaranya:

- a-b: Kompresi isentropis, terjadi dalam *boiler feed pump*.
- b-c: Pemanasan air pada tekanan konstan, terjadi dalam *economizer*.
- c-d: Penguapan air sampai menjadi uap jenuh pada tekanan dan temperatur konstan, terjadi dalam *Evaporator*.
- d-e: Uap jenuh dikeringkan lebih lanjut sampai menjadi uap panas lanjut pada tekanan konstan, terjadi dalam *Superheater*.
- e-f: Ekspansi *Isentropis* (Adiabatis), terjadi dalam Turbin Uap.
- f-a: Kondensasi uap pada tekanan dan temperatur konstan, terjadi dalam kondensor.

Pembangkit listrik tenaga uap yang terdiri dari beberapa komponen penting yaitu generator listrik, turbin uap, boiler, dan kondensor. Jumlah energi yang masuk sebagai bahan bakar boiler disebut E_m , dan energy efektif pada poros turbin disebut energi kerja E_k . Energi yang terbuang melalui kondensor disebut E_b dan kerugian lainnya adalah E_b (Cengel, Y. A., & Boles, M. A., 2015), maka dapat disebut dalam persamaan berikut ini:

$$E_m = E_k + E_b \quad (2.13)$$

Untuk efisiensi dapat ditulis:

$$\eta = \frac{E_k}{E_m} = \frac{E_m - E_b}{E_m} \quad (2.14)$$

2.2.7 Biaya Pembangkit PLTU

Biaya pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap perlu ada perhitungan berdasar hasil analisis efisiensi pembangkit tersebut. Mengacu pada penelitian sebelumnya oleh saudara Rika, Mafrizal, 2013, bahwa untuk menentukan harga jual pembangkit PLTU 3.400 MW yang bertujuan untuk menganalisis struktur harga yang bisa menyimpulkan terhadap harga bahan bakar yang mempengaruhi terhadap harga jual listrik per Kwh dengan meningkatnya efisien penjualan dari daya beli pasar.

Dalam menentukan harga jual listrik untuk jangka panjang dilakukan pendekatan dengan biaya (*cost based*) untuk mengeditifikasi biaya yang digunakan pada produksi energi listrik dapat memperhitungkan nilai *margin/ Profit* yang diharapkan oleh setiap pembeli. Adapun bentuk biaya yang disebut komponen ABCD didasarkan biaya yang digunakan (*cost based*) yakni:

A. Komponen A

Komponen A adalah *fixed cost*, biaya tetap atau biaya yang harus dikeluarkan dari pembangkit listrik yang beroperasi atau tidak. Komponen A disebut juga biaya modal, yang merupakan biaya konstruksi pembangkit listrik itu sendiri seperti biaya pembelian komponen material, peralatan utama turbin, generator dan lain lain. Untuk menentukan komponen A didapatkan dengan persamaan dibawah ini:

$$Komp. A \left(\frac{Rp}{kW} \text{ tahun} \right) = \frac{\Sigma(Biaya penyusutan + Buang pinjaman + Margin)}{(DMN \times EAF \text{ Declare})} \quad (2.15)$$

Dimana:

- a) Daya Mampu *Netto* (DMN) adalah kemampuan output daya yang dibangkit oleh pembangkit listrik Tenaga Uap yang disalurkan ke system. PLTU dengan kapasitas 3.400 MW memiliki DMN kurang lebih 3.211 MW.
- b) Faktor Kesiapan (EAF) dapat ditentukan dengan melihat kemampuan dari pembangkit tersebut, Jika semakin kecil pemeliharaan EAF yang dihasilkan aktual dilapangan teori *practical capacity* bisa menentukan total kapasitas penggunaan berdasar kemampuan mesin dan jadwal waktu pemeliharaan, kondisi mesin mati saat masa liburan. Perlu mengevaluasi pencapaian faktor kesiapan/ EAF tahunan sebelumnya dibandingkan, sehingga kehilangan pendapatan atas faktor kesiapan/ EAF dapat diminimalisir disebut Margin (Ekuitas x ROE).

B. Komponen B

Komponen B adalah *variable cost/fixed OM cost*, merupakan biaya operasi dan perawatan pembangkit itu sendiri. Komponen B sudah terhitung dengan upah karyawan, biaya operasional manajemen dapat menentukan dalam analisa melalui persamaan dibawah ini:

$$Komp.B \left(\frac{Rp}{kW} \text{ tahun} \right) = \frac{\Sigma(Biaya \text{ pemeliharaan} + Buang \text{ adm} + Biaya \text{ kepegawaian})}{(DMN \times EAF \text{ Declare})} \quad (2.16)$$

C. Komponen C

Komponen C merupakan biaya bahan bakar atau *fuel cost*. Nilai komponen C dapat berpengaruh dari banyaknya konsumsi bahan bakar yang digunakan, lama waktu pengoperasian pembangkit listrik dapat menggunakan dengan persamaan dibawah ini:

$$SFC = \frac{M_f}{P_{out_B}} \quad (2.17)$$

$$Komp.C \left(\frac{Rp}{kW} \text{ tahun} \right) = \text{Harga bahan bakar} \frac{\text{Heat rate}}{\text{Nilai kalor}} \quad (2.18)$$

Dimana:

- a) *Heat rate* (kcal/kwh) adalah nilai efisiensi pembangkit dalam menghasilkan Listrik.
- b) Nilai kalor bahan bakar (kcal/kg), sesuai bahan bakar yang digunakan apabila Semakin besar nilai kalor yang dihasilkan maka tingkat produksi bahan bakar

pembangkit semakin baik.

D. Komponen D

Komponen D didasari dari komponen B, namun komponen D termasuk pada variable OM *cost* yang meliputi biaya pelumas pembangkit. Dimana kinerja pembangkit selalu aktif maka nilai dari komponen D akan meningkat. Untuk menentukan hasil analisa pada komponen D dapat menggunakan persamaan dibawah ini:

$$Komp. D \left(\frac{Rp}{kW} tahun \right) = \frac{Biaya\ minyak\ pelumas + Kimia + Air}{Energi\ yang\ dibangkitkan} \quad (2.19)$$