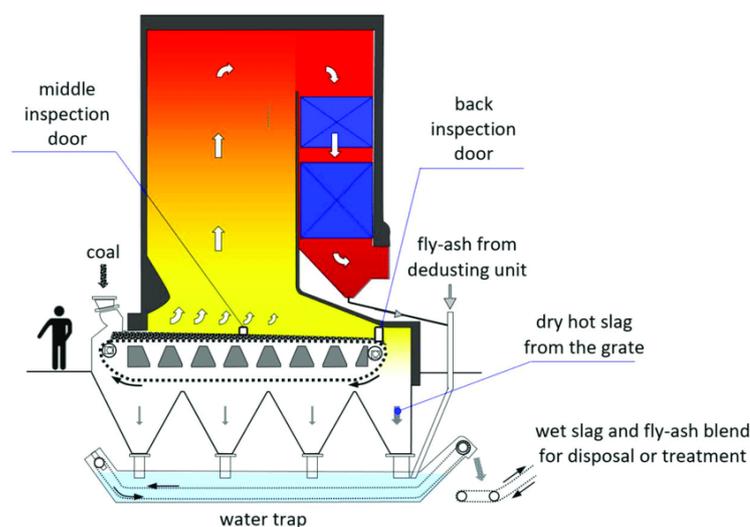


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Dasar – Dasar PLTU Stoker

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan jenis pembangkit yang menggunakan uap panas untuk memutar turbin. Uap panas yang digunakan dapat berasal dari proses penguapan air melalui boiler, pembangkit ini menggunakan bahan bakar batu bara maupun bahan bakar minyak untuk memanaskan air. Pada PLTU terdapat peralatan-peralatan Utama yaitu Boiler, Turbin, Transformator, Boiler Feedpump dan Generator. Dan juga peralatan bantu seperti WTP, Coal Handling, Cooling Tower, CWP, dan lain-lain. Chain grate spreader stoker boiler adalah salah satu teknologi pembakaran tertua yang telah digunakan sejak awal abad kedua puluh (Giaier dan Loviska, 1997). Meskipun kategori teknologi lama namun *Stoker Boiler* telah digunakan secara luas untuk pembangkit listrik skala kecil di daerah terpencil atau pulau kecil di Indonesia dan untuk industri. Meskipun telah berada di industri selama bertahun-tahun, teknologi *Chain Grate stoker spreader type* berbahan bakar batubara masih menghadirkan tantangan dalam hal pembakaran batubara yang tidak efisien (Lin *et al.*, 2009)



Gambar 2.1 Schematic layout stoker boiler (Ta'nczuk et al., 2018)

Prinsip kerja sistem pembakaran pada *boiler* adalah sistem *chain grate stoker* berdasarkan Gambar 2.1 *Schematic layout stoker boiler diagram* dan komponen utama *chain grate stoker* dapat dilihat pada Tabel II.1 adalah sebagai berikut:

1. Batubara ditransferkan dari *coal shed* ke *coal bunker* dengan menggunakan *conveyor*.
2. Dari *coal bunker* batubara turun dengan system gravitasi ke ruang bakar melalui *coal spreader*.
3. Kemudian batubara di dorong/lempar oleh *coal spreader* dan jatuh di *bed chain grate stoker*.
4. Ketika *chain grate* berputar sepanjang tungku dan selama proses batubara terbakar diharapkan batubara sudah habis terbakar menjadi abu kemudian jatuh ke *slag conveyor*.

Tabel II.1 Spesifikasi komponen Utama PLTU Chain Grate Stoker

NO	EQUIPMENT	KETERANGAN
1	GENERATOR	Manufactured : Shangdong Qingneng Power Co.Ltd Standard Of Manufacture : IEC 60034 Rate Power : 10000 KW Rate Voltage : 10.5 KV Neutral Earthing System : Neutral Grounding Transformer Neutral Earthing Current : 10-15 A Cooling System : Closed Air Cooling System
2	STEAM TURBINE	Merk : Shangdong Qingneng Type : N9. 5-4.9 Rated Power : 9.5 mw Rated Speed : 3000 r/min Inlet Steam Pressure : 4.9 MPa Inlet Steam Temp. : 470°C Rotate Direction : Clockwise (Seen From steam Flow Side) Turbine Main Body Weight : 47.7 Ton Rotor Weight : 6.91 Ton
3	BOILER	Boiler Type : Stoker (chain grate) Surface Area Of Furnace : 19,792 M2 Steam Capacity : 45000 Kg/Hours Design Pressure : 70 Bar (G) Operating Pressure : 55 Bar (G) Years Of Manufacture : 2013
4	CONDENSOR	Model : N-1000 Type : Two Pass Surface Cooling Area : 1000 m2 Steam Flow : 48 t/h Cooling Water : 3241 t/h Cooling Temp : 30 °C
5	AUX. TRANSFORMER	Manufacture : PT Bambang Djaja Product Type : ONAN Capacity : 2500 kVA Primary Voltage : 10,5 KV Secondary Voltage : 0,4 KV
6	BOILER FEED PUMP	Manufacturer : Kirloskar Ebara Pumps Ltd Capacity : 23 m3/hr Min Flow : 6,3 m3/hr Speed : 2965 rpm Total Head : 800 m

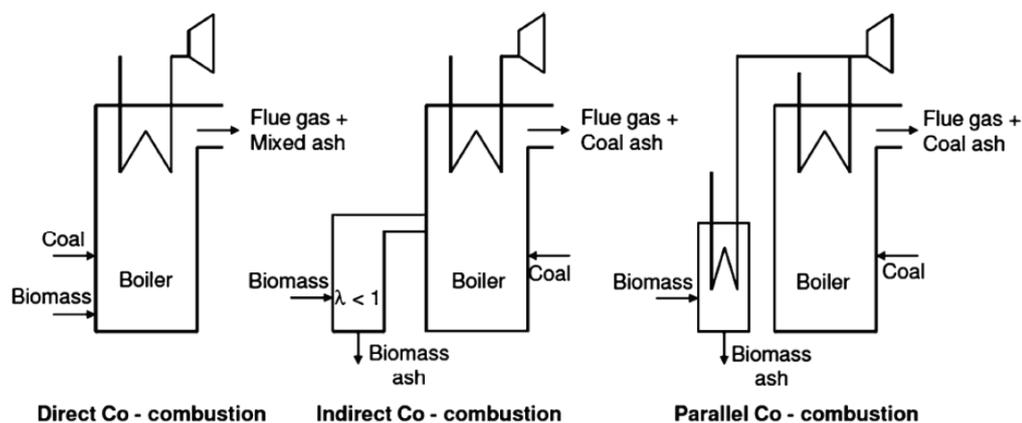
2.2. *Co-firing* Batubara Dengan Biomassa

Co-firing adalah penambahan biomassa sebagai bahan bakar pengganti parsial ke dalam boiler PLTU batubara. Proses *Co-Firing* dilakukan tanpa menambah biaya (capex) ataupun membangun pembangkit EBT (biomassa) baru, sehingga lebih kompetitif. Benefit yang dihasilkan dari program *Co-firing* pada PLTU batubara adalah reduksi emisi CO₂ sehingga dapat mendorong Indonesia menjadi lebih hijau. Program *Co-Firing* PLTU batubara dengan biomassa merupakan salah satu dari program PLN “*Green Booster*” untuk mendukung target bauran energi EBT nasional. *Co-firing* batubara dan biomassa di pembangkit eksisting sangat berpengaruh dalam pencapaian renewable energy, pengurangan emisi karbon dan biomassa merupakan *CO₂- zero net emission* (XuebinWang et al., 2021). Penggunaan biomassa sebagai substitusi bahan bakar Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) sejalan dengan upaya Indonesia menuju *net zero emission* di masa depan. Selain turut meningkatkan kontribusi energi terbarukan pada bauran energi nasional, *Co-firing* juga berdampak positif kepada pengembangan ekonomi kerakyatan (*circullar economy*) karena dapat membuka lapangan kerja dan peluang bisnis di sektor biomassa khususnya yang berbasis sampah dan limbah. *Co-firing* dianggap sebagai pendekatan jangka pendek yang paling menjanjikan untuk mengurangi CO, dengan mitigasi emisi melalui penggunaan biomassa. Adapun beberapakeuntungan melakukan *Co-firing* biomassa pada PLTU antara lain:

1. Investasi yang relative lebih rendah deibandingkan investasi pembangkit yang didedikasi khusus untuk biomassa
2. Dampak lingkungan yang lebih baik jika dibandingkan dengan pembangkit yang menggunakan 100% biomassa

Sampai sejauh ini substitusi bahan bakar alternatif dalam system *Co-firing* rata-rata sebanyak 5% sampai dengan 10%, semakin tinggi komposisi bahan bakar alternatif semakin rendah efek Gas Rumah Kaca (GRK) yang dihasilkan. *Co-firing* batubara dan biomassa berpotensi menurunkan emisi CO₂.

Pembakaran batubara dan biomassa adalah gabungan pembakaran batubara dan biomassa. Biomassa dapat digunakan untuk menyalakan boiler menggunakan tiga metode yang berbeda yaitu *Direct Co-firing*, *Indirect Co-firing*, *Parallel Co-firing* (Xu *et al.*, 2020). Teknologi pembakaran gabungan batubara dan biomassa dinilai paling mudah digunakan dan paling murah. Ada beberapa cara untuk menggabungkan teknologi pembakaran batubara dan biomassa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Metode Co-firing batubara dengan biomassa

Sumber: (Dam-johansen *et al.*, 2013)

Pembakaran batubara dan biomassa adalah gabungan pembakaran batubara dan biomassa. Biomassa dapat digunakan untuk menyalakan boiler menggunakan tiga metode yang berbeda yaitu *Direct Co-firing*, *Indirect Co-firing*, *Parallel Co-firing* (Xu *et al.*, 2020).

1. *Direct Co-firing*

Pencampuran bahan bakar alternatif dan batubara pada coal handling system kemudian diumpankan ke boiler.

2. *Indirect Co-firing*

Bahan bakar alternatif dan batubara diumpakan secara terpisah ke boiler, tetapi diperlukan peralatan tambahan yaitu gasifier biomassa tersendiri. Biomassa terlebih dahulu di gasifikasi menjadi syngas dalam mesin

gasifier sebelum akhirnya masuk ke boiler batubara untuk pembakaran. Kelebihan dari metode ini adalah proses pemurnian syngas yang dapat meminimalkan dampak pencemaran dari pembakaran langsung. Metode ini memerlukan investasi peralatan tambahan (gasifier) dan dipergunakan co-firing dengan presentasi biomassa lebih tinggi

3. *Parallel Co-firing*

Metode ini diperlukan boiler biomassa terpisah dari boiler batubara, uap yang dihasilkan dari pembakaran pada boiler biomassa dan boiler batubara dicampur kemudian dipergunakan untuk memutar turbin dan generator untuk menghasilkan energi listrik. Metode ini memungkinkan pemanfaatan biomassa lebih maksimal atau dalam skala besar, akan tetapi membutuhkan investasi yang besar juga.

Dari ketiga metode tersebut, yang paling mudah, murah dan minimal dalam penyediaan sarana pendukung yaitu *Direct Co-firing* karena pencampurannya disarana coal handling yang terdapat fasilitas disetiap PLTU.

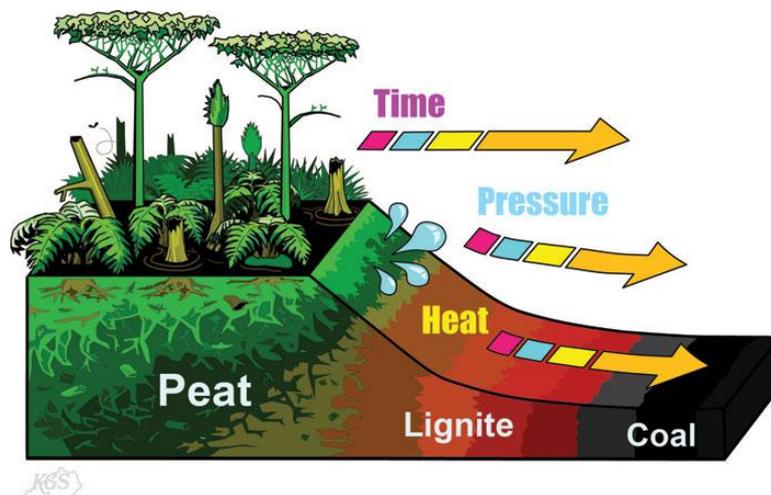
Tabel II. 2 Co-firing pada PLTU batubara di lingkungan PT. PLN (Persero) (RUPTL 2021-2030, 2021)

No	Pembangkit	Biomassa
1	PLTU Jeranjang, PLTU Lontar	Pellet sampah
2	PLTU Paiton 1&2, PLTU Indramayu, PLTU Rembang, PLTU Ropa, PLTU Adipala	Pellet kayu
3	PLTU Anggrek, PLTU Bolok, PLTU Tembilahan, PLTU Tarahan	Wood chip
4	PLTU Tenayan, PLTU Ketapang, PLTU Sanggau, PLTU Belitung, PLTU Teluk Balikpapan, PLTU Nagan Raya, PLTU Sintang	Palm Kernel shell
5	PLTU Pacitan, PLTU Barru, PLTU Labuan	Saw dust

6	PLTU Suralaya 1-4	Sekam padi
---	-------------------	------------

2.3. Bahan Bakar - Batubara

Batubara adalah batuan sedimen hitam atau coklat tua yang mudah terbakar, bahan bakar fosil dan terbentuk dari dekomposisi bahan organik yang awalnya terakumulasi di rawa-rawa dan rawa gambut yang telah mengalami panas geologis dan tekanan selama jutaan tahun, sebagian besar terdiri dari karbon dan hidrokarbon (D. Mahapatra, 2015). Klasifikasi batubara, dari yang memiliki karbon paling sedikit hingga yang paling banyak karbon, adalah lignit, sub-bituminus, bituminus dan antrasit (D. Mahapatra, 2015). Batubara adalah batuan hidrokarbon dibentuk dari tumbuhan dalam kondisi bebas oksigen, disertai dengan pengaruh tekanan dan panas. Proses *Coalification* memerlukan waktu jutaan tahun, yang dimulai dari pembentukan gambut, lignit, subbituminus, bituminous, hingga terbentuk antrasit (Achmad Prijono, 1992).



Gambar 2. 3 Teori Drift Batubara (Mustasim Billah, 2010)

Klasifikasi batubara adalah pengelompokan batubara yang berbeda menurut karakteristik atau sifat tertentu, seperti; Jenis batubara, kadar, rasio karbon terhadap hidrogen dan *volatile* (*Handbook of Coal Analysis*, 2005). Batubara dibagi menjadi empat jenis atau kelas utama: Antrasit, bituminous, sub bituminus

dan lignit. Kualitas batubara tergantung pada jenis dan jumlah batubara serta besarnya energi panas yang dihasilkan oleh batubara tersebut.

Berdasarkan standar ASTM D388, *klasifikasi batubara* menggunakan parameter volatile matter, fixed carbon & heating value untuk proximate analysis ASTM D3172.

Tabel II. 3 Klasifikasi jenis dan kualitas batubara menurut ASTM

Table 10: Classification of Coals by the American Society for Testing and Materials									
rank and group	fixed carbon percentage (dry, mineral-matter-free basis)		volatile matter percentage (dry, mineral-matter-free basis)		caloric value (moist, mineral-matter-free basis)*				agglomerating character
	equal to or greater than	less than	greater than	equal to or less than	British thermal units per pound		mega joules per kilogram		
					equal to or greater than	less than	equal to or greater than	less than	
Anthracitic									
Meta-anthracite	98	***	***	2	***	***	***	***	nonagglomerating
Anthracite	92	98	2	8	***	***	***	***	
Semianthracite †	86	92	8	14	***	***	***	***	
Bituminous									
Low-volatile bituminous	78	86	14	22	***	***	***	***	commonly agglomerating ‡
Medium-volatile bituminous	69	78	22	31	***	***	***	***	
High-volatile A bituminous	***	69	31	***	14,000 ‡	***	32.6	***	
High-volatile B bituminous	***	***	***	***	13,000 ‡	14,000	30.2	32.6	
High-volatile C bituminous	***	***	***	***	11,500	13,000	26.7	30.2	agglomerating
					10,500	11,500	24.4	26.7	
Subbituminous									
Subbituminous A	***	***	***	***	10,500	11,500	24.4	26.7	nonagglomerating
Subbituminous B	***	***	***	***	9,500	10,500	22.1	24.4	
Subbituminous C	***	***	***	***	8,300	9,500	19.3	22.1	
Lignitic									
Lignite A	***	***	***	***	6,300	8,300	14.7	19.3	nonagglomerating
Lignite B	***	***	***	***	***	6,300	***	14.7	

* Moist coal contains natural inherent moisture but does not include visible water on the surface. † If agglomerating, classify in low-volatile group of the bituminous rank. ‡ Coals having 69 percent or more fixed carbon on the dry, mineral-matter-free basis are classified by fixed carbon, regardless of calorific value. § There may be nonagglomerating varieties in these groups of the bituminous rank; there are also notable exceptions in the high-volatile C bituminous group.

Dari table klasifikasi batubara oleh ASTM diatas, dapat dilihat beberapa *rank* dan *group* batubara yaitu:

1. Rank Anthracitik

Merupakan batubara tertinggi dengan kualitas terbaik dan memiliki kandungan karbon tetap 86-98%. Terdiri dari beberapa kelompok, yaitu:

- a. *Meta – Anthracite*: Ini adalah kelompok batubara terbaik dari kelas antrasit, di mana kandungan karbon tetap bisa > 98% dan kandungan volatil < 2% (dalam keadaan *dry*)
- b. *Anthracite*: Merupakan grup batubara pada rank anthracite yang mengandung persentase *fixed* karbon >92% - <98% serta persentase kandungan volatile matternya >2% - <8% (dalam keadaan *dry*).

- c. *Semi – Anthracite*: Merupakan grup batubara pada rank anthracite yang mengandung persentase *fixed* karbon >86% - <92% serta persentase kandungan *volatile matter*nya >9% - <14% (dalam keadaan dry)

2. Rank Bituminous

Merupakan Rank batubara yang memiliki persentase *fixed* karbon sebesar <69% - <86% serta persentase kandungan *volatile matter* >32% - <22%.
Terdiri atas beberapa grup, yaitu:

- a. *Low - Volatile Bituminous*: Merupakan grup batubara dalam rank bituminous yang mengandung persentase *l* karbon sebesar >78% - <86% serta persentase kandungan *volatile matter*nya sebesar >14% - <22% (dalam keadaan dry)
- b. *Medium – Volatile Bituminous*; Merupakan grup batubara dalam rank bituminous yang memiliki kandungan *fixed* karbon sebesar >69% - <78% serta persentase kandungan *volatile matter* sebesar >22% - <31% (dalam keadaan dry)
- c. *High – Volatile A Bituminous*; Merupakan grup batubara dalam rank bituminous yang memiliki persentase *fixed* karbon sebesar <69% , persentase kandungan *volatile matter*nya sebesar >31%, serta nilai kalorinya >14000 BTU/lb (dalam keadaan dry)
- d. *High – Volatile B Bituminous*; Merupakan batubara dalam rank bituminous yang mempunyai nilai kalori sebesar >13000 BTU/lb - <14000 BTU/lb (dalam keadaan dry)
- e. *High – Volatile C Bituminous*; Merupakan batubara dalam rank bituminous yang mempunyai nilai kalori sebesar >11500 BTU/lb - <13000 BTU/lb (dalam keadaan dry)

3. Rank Sub-Bituminous

Merupakan Rank batubara yang mengandung nilai kalori >8300 BTU/lb - <11500 BTU/lb. Terdapat atas beberapa grup, yaitu:

- a. Sub-Bituminous A; Merupakan batubara dalam rank subbituminous yang mempunyai nilai kalori sebesar >10500 BTU/lb - <11500 BTU/lb (dalam keadaan dry)
- b. Sub-Bituminous B; Merupakan batubara dalam rank subbituminous yang mempunyai nilai kalori sebesar >9500 BTU/lb - <10500 BTU/lb (dalam keadaan dry)
- c. Sub-Bituminous C; Merupakan batubara dalam rank subbituminous yang mempunyai nilai kalori sebesar >8300 BTU/lb - <9500 BTU/lb (dalam keadaan dry)

4. Rank Lignitik

Merupakan Rank batubara yang paling rendah dan memiliki kualitas rendah dengan nilai kalori <6300 BTU/lb - <8300 BTU/lb. Terdiri atas beberapa grup, yaitu:

- a. Lignit A; Merupakan grup batubara dalam rank lignitic yang mempunyai nilai kalori sebesar >6300 BTU/lb - <8300 BTU/lb (dalam keadaan dry).
- b. Lignit B ; Merupakan grup batubara dalam rank lignitic yang mempunyai nilai kalori <6300 BTU/lb (dalam keadaan dry).

Selain klasifikasi ASTM, batubara juga memiliki sistem ISO (International Standard Organization). ISO mengklasifikasikan batubara berdasarkan peringkat. Penentuan peringkat ini menggunakan vitrinit (R_v) dari hasil analisis petrografi batubara. Batubara menurut ISO dibagi menjadi:

1. Batubara Peringkat Rendah (*Low Rank Coal*)

Batubara kualitas rendah adalah batubara lignit dan bituminous dengan R_v kurang dari 0,5%. Batubara berkadar rendah ini memiliki ciri fisik berwarna coklat kusam atau sering disebut dengan lignit. Batubara jenis ini sangat porous, mudah hancur, sangat reaktif dan mudah terbakar.

2. Batubara Peringkat Menengah (*Medium Rank Coal*)

Batubara peringkat menengah adalah batubara jenis bituminus yang mempunyai Rv 0,5 hingga 0,2. Batubara jenis ini mempunyai ciri warna hitam mengkilat atau sering juga disebut black coal. Bila dibandingkan dengan batubara peringkat rendah, batubara jenis ini mempunyai reaktivitas yang lebih rendah. Selain itu, batubara jenis ini memiliki porositas yang rendah, tetapi tidak mudah menyerap air.

3. Batubara Peringkat Tinggi (High Rank Coal)

Batubara peringkat tinggi adalah batubara jenis antrasit yang mempunyai Rv 2,0 hingga 6,0. Batubara jenis ini berwarna hitam mengkilat sampai keperakan. Ketahanannya terhadap cuaca paling tinggi dan tidak mudah hancur apabila terjadi perubahan cuaca. Reaktivitasnya paling rendah dibandingkan dengan batubara peringkat rendah dan peringkat menengah sehingga tidak mudah terbakar. Kadar air batubara jenis ini paling rendah dan sebaliknya kadar karbon lebih tinggi dari dua jenis batubara sebelumnya. Pada umumnya nilai kalori batubara yang digunakan oleh pembangkit listrik di Indonesia terbagi dalam 3 golongan. antara lain:

Low rank coal (LRC) : 4200 – 4800 kCal/kg

Medium rank coal (MRC) : 5100 kCal/kg

High rank coal (HRC): 5800 kCal/kg

Batubara memiliki berbagai unsur kimia, dan unsur kimia inilah yang membuat batu bara terbakar dan menghasilkan energi. Unsur-unsur kimia tersebut sesuai dengan table II.4 di bawah ini.

Tabel II. 4 Rentang nilai properties jenis batubara

Item	Anthracite	Bituminous	Subbituminous	Lignite
Moisture (%)	3 - 6	2 - 15	10 - 25	25 - 45
Volatile matter	2 - 12	15 - 45	28 - 45	24 - 32
Fixed carbon (%)	75 - 85	50 - 70	30 - 57	25 - 30
Ash (%)	4 - 15	4 - 15	3 - 10	3 - 15
Sulfur (%)	0.5 - 2.5	0.5 - 6	0.3 - 1.5	0.3 - 2.5
Hydrogen (%)	1.5 - 3.5	4.5 - 6	5.5 - 6.5	6 - 7.5
Carbon (%)	75 - 85	65 - 80	55 - 70	35 - 45

Nitrogen (%)	0.5 – 1	0.5 – 2.5	0.8 – 1.5	0.6 – 1
Oxygen (%)	5.5 - 9	3.5 - 10	15 – 30	38 – 48
Btu/lb	12.000 -	12.000 -	7500 – 10.000	6000 – 7500
Density (g/mL)	1.35 – 1.70	1.28 – 1.35	1.35 – 1.40	1.40 – 1.45

Dari tabel II. 4 diatas dapat dilihat batubara antrasit memiliki unsur kimia karbon yang lebih tinggi dibandingkan jenis lainnya, hal ini menunjukkan kualitas batubara antrasit yang lebih baik dan memiliki kandungan energi yang lebih tinggi

2.4. Bahan Bakar - Biomassa

Pesatnya perkembangan teknologi dan ekonomi tidak pernah lepas dari kebutuhan energi yang terus meningkat, karena terdapat hubungan yang erat antara keduanya. Namun, sebagian besar energi yang dikonsumsi masyarakat adalah bahan bakar fosil yang tidak dapat diperbarui seperti minyak bumi dan batu bara. Salah satu solusi untuk masalah ini adalah penghematan energi, di sisi lain, teknologi biomassa semakin berkembang. Biomassa sendiri merupakan istilah yang mengacu pada semua senyawa organik tumbuhan, ganggang dan limbah organik yang dapat digunakan sebagai sumber energi alternatif dengan menggunakan bahan baku terbarukan.

Energi ini merupakan sumber energi terbarukan yang berasal dari bahan-bahan biologis, seperti tanaman, pertanian, perkebunan dan limbah industri serta rumah tangga yang bersifat organik. Biomassa merupakan salah satu sumber energi baru dan terbarukan (EBT) yang potensinya sangat melimpah di Indonesia, tetapi penggunaannya belum optimal. Biomassa yang digunakan sebagai sumber energi (bahan bakar) di Indonesia pada umumnya, memiliki nilai ekonomis rendah, atau merupakan limbah yang telah diambil produk primernya. Biomassa tersebut banyak berasal dari tanaman dan limbah hasil perkebunan seperti kelapa sawit, kelapa dan tebu, serta limbah hasil hutan. Limbah hasil hutan misalnya limbah gergajian dan limbah produksi kayu, memiliki potensi yang sangat besar untuk di manfaatkan sebagai energi alternatif.

Pemerintah telah mendorong penggunaan energi baru dan terbarukan melalui Peraturan dan Undang-Undang yang telah diterbitkan. Biomassa merupakan salah satu sumber energi baru dan terbarukan (EBT) yang potensinya sangat melimpah di Indonesia, tetapi penggunaannya belum optimal. Biomassa yang digunakan sebagai sumber energi (bahan bakar) di Indonesia pada umumnya, memiliki nilai ekonomis rendah, atau merupakan limbah yang telah diambil produk primernya. Tabel II. 5 menunjukkan bahwa potensi biomassa untuk sumber energi ketenagalistrikan di Indonesia mencapai 32.6 GW (ESDM 2020).

Tabel II. 5 Potensi Biomassa di Indonesia (ESDM, 2020)

No	Potensi	Sumatera	Kalimantan	Jamali	Nusa Tenggara	Sulawesi	Maluku	Papua	Total (MWe)
1	Kelapa Sawit	8,812	3,384	60	-	323	-	75	12,654
2	Tebu	399	-	854	-	42	-	-	1,295
3	Karet	1,918	862	-	-	-	-	-	2,781
4	Kelapa	53	10	37	7	38	19	14	177
5	Sekam Padi	2,255	642	5,353	405	1,111	22	20	9,808
6	Jagung	408	30	954	85	251	4	1	1,733
7	Singkong	110	7	120	18	12	2	1	271
8	Kayu	1,212	44	14	19	21	4	21	1,335
9	Limbah Ternak	96	16	296	53	65	5	4	535
10	Sampah Kota	326	66	1,527	48	74	11	14	2,066
Total (MWe)		15,588	5,062	9,215	636	1,937	67	151	32,654

Properties biomassa Komponen kimia dari biomassa kayu terdiri dari unsur utama terutama unsur karbon, hidrogen, dan oksigen. Kandungan properties biomassa pada umumnya terdiri dari *moisture content (intrinsic and extrinsic)*, *calorific value*, *proportions of fixed carbon and volatiles*, *ash/residue content*, *alkali metal content*, *cellulose/lignin ratio* (McKendry, 2002). Unsur kimia pada biomassa umumnya terdiri dari C, O, H, N, Ca, K, Si, Mg, Al, S, Fe, P, Cl, Na, Mn, and Ti (Vassilev *et al.*, 2010, Vasiller, 2010). Komposisi dan sifat fisik tanaman memiliki pengaruh penting pada kandungan energi biomassa. Biomassa umumnya dicirikan oleh komposisi organiknya, analisis unsur, analisis proksimat, dan sifat-sifat seperti nilai kalor dan densitas.

Tabel II. 6 Properties biomassa

	Feedstock	Corn stover	Herbeceous Crop	Woody Crop
Organic composition (wt%)	Cellulose	53	45	50
	Hemicellulose	15	23	23
	Lignin	16	22	22
	Other	16	5	5
Elemntal analysis (dry%)	C	44	47	48
	H	5.6	5.8	5.9
	O	43	42	044
	N	0.6	0.7	0.5
Proximate analysis (dry wt%)	Ash	6.8	4.5	1.6
	Volatile matter	75	81	82
	Fixed C	19	15	16
	Ash	6	4	1.3
HHV (MJ/kg)		17.7	18.7	19.4
Bulk density (Kg/m)		160 – 300	160 – 300	280 – 480
Yield (Mg/ha)		8400	14000	14000

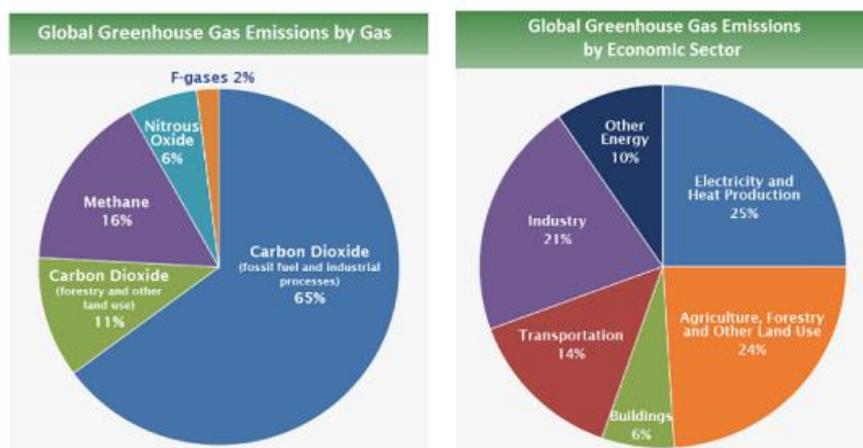
Sumber: Brown, R.C., *Biorenewable Resources: Engineering New Products from Agriculture*, Iowa State Press, A Blackwell Publishing Company, Ames, IA, 2003, pp. 59–75.

Dari unsur-unsur tersebut dimungkinkan masih menghasilkan emisi berupa CO₂, SO₂ dan NO_x ketika dibakar. Namun, karena nilai unsur kimia biomassa lebih rendah dari batubara seperti yang ditunjukkan pada Tabel II.5 dan karbon dioksida adalah CO₂ netral, penggunaan biomassa yang dicampur dengan batubara dapat mengurangi emisi SO₂ dan CO₂ serta emisi NO_x (Xu et al., 2020).

2.5. Emisi Gas Buang

Perubahan iklim merupakan fenomena global yang disebabkan oleh aktivitas manusia yang dipicu oleh penggunaan bahan bakar fosil untuk mendukung kegiatan industri dan produksi listrik. Kegiatan tersebut merupakan sumber utama gas rumah kaca, terutama karbon dioksida (CO₂). Perubahan iklim merupakan fenomena global yang disebabkan oleh aktivitas manusia yang

didorong oleh penggunaan bahan bakar fosil untuk mendukung kegiatan industri dan pembangkit listrik. Kegiatan tersebut merupakan sumber utama gas rumah kaca, terutama karbon dioksida (CO₂). Sesuai dengan undang-undang nomor 16 Tahun 2016 tentang persetujuan paris atas konvensi kerangka kerja perserikatan bangsa-bangsa mengenai perubahan iklim, bahwa dalam upaya mengendalikan berlanjutnya perubahan iklim, pemerintah Indonesia Bersama-sama dengan anggota masyarakat international melalui konferensi para pihak ke-21 United Nation Framework convention on Climate Change pada tahun 2015 telah mengadopsi paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Persetujuan Paris bertujuan untuk menahan kenaikan suhu rata-rata global dibawah 2⁰C dimasa pra-industrialisasi.



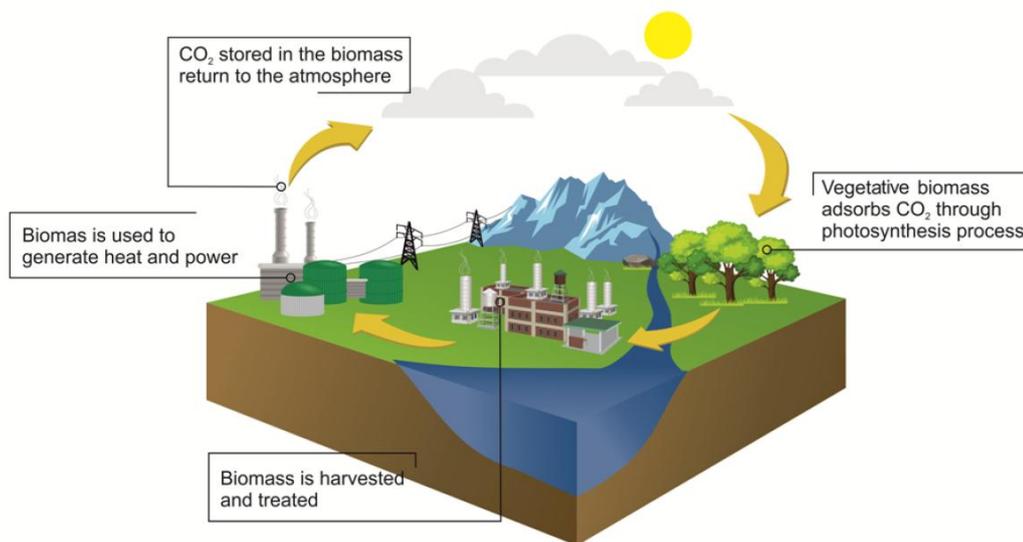
Gambar 2. 4 Emisi global (IPCC, 2014)

Dari Gambar II.3 diatas menunjukkan bahwa emisi gas yang paling besar adalah karbon dioksida (CO₂) dengan prosentase 65% berasal dari sector Pembangkitan (*fossil fuel*) dan industrial proses, demikian juga untuk sektor ekonomi penyumbang terbesar dari sektor electricity dan heat production (Energi) dengan prosentase 25%.

Menentukan koefisien emisi pembangkit sangat penting untuk menghitung jumlah emisi CO₂ melalui produksi listrik, yang satuannya adalah kg/kWh. Dengan

diketuainya faktor emisi CO₂ sebuah pembangkit, akan dengan cepat diketahui banyaknya kg emisi CO₂ yang dihasilkan ketika pembangkit tersebut memproduksi energi listrik (kWh) pada level tertentu, yaitu dengan cara mengalikan faktor emisi tersebut dengan energi yang dibangkitkan.

Biomassa merupakan sumber energi yang sepenuhnya terbarukan karena CO₂ yang dilepaskan selama pembakaran dan penggunaan tidak menyebabkan peningkatan karbon dioksida di atmosfer karena berasal dari sumber biogenik.



Gambar 2. 5 Siklus emisi dan pemanfaatan biomassa (Tursi, 2019)

Pada table II. 4 menunjukkan bahwa eksploitasi biomassa dapat menyebabkan transfer CO₂ lebih cepat ke atmosfer yang akan digunakan kembali oleh tanaman untuk menghasilkan biomassa kembali (Tursi, 2019).

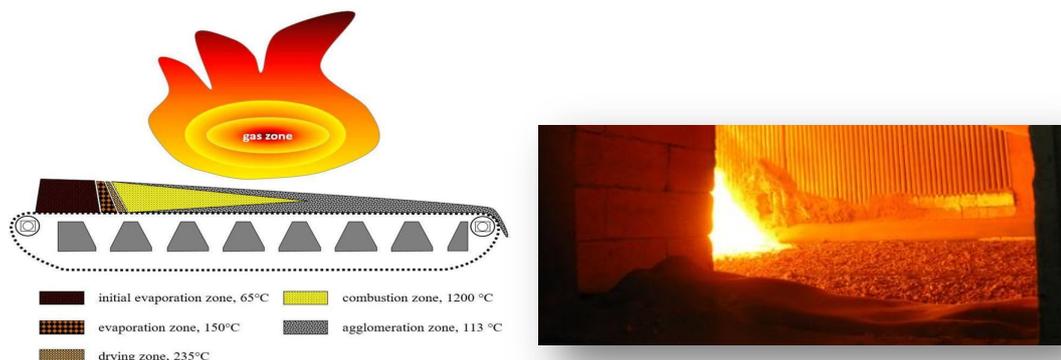
Batubara saat ini merupakan salah satu jenis bahan bakar yang banyak digunakan pada pembangkit listrik tenaga uap. Partikulat abu batubara memiliki kemampuan untuk menempel pada dinding boiler dan kemampuan menempelnya abu ini terutama dipengaruhi oleh suhu leleh abu (*ash fusion temperature, AFT*). Ada 2 jenis fenomena menempel nya abu batubara pada dinding boiler, yaitu *slagging* dan *fouling*. *Slagging dan fouling* adalah fenomena dimana abu batubara

menempel dan terakumulasi, yang meleleh pada pipa boiler. Kedua masalah ini sangat penting karena dapat berdampak signifikan pada pengoperasian boiler, seperti; masalah perpindahan panas, kehilangan daya boiler, pipa tersumbat dan kerusakan pipa. *Slagging* adalah fenomena di mana partikel abu batubara dalam bentuk padat dan cair menempel pada permukaan dinding konduktif termal yang terletak di zona pembakaran suhu tinggi. *Fouling* adalah fenomena menempel dan menumpuknya abu pada dinding terpat terjadinya perpindahan panas (*super heater maupun re-heater*). Terbentuknya *slagging* dan *fouling* pada dinding dan tube akan mempengaruhi proses perpindahan panas pada boiler, peningkatan konsumsi bahan bakar, dengan tentunya dapat menyebabkan turunnya efisiensi dari boiler. Pada proses pembakaran batubara selain menghasilkan panas juga menghasilkan partikulat abu yang terbawa bersama gas panas. Metode evaluasi indeks *slagging* dan *fouling* menggunakan analisa karakteristik batubara melalui perhitungan indeks *slagging* dan *fouling*. Analisa karakteristik batubara dengan menggunakan analisis komposisi abu (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , TiO_2 , MnO_2), *ash fusion temperature*, analisis *proximate* (kadar air, abu, zat terbang, dan karbon padat), analisis *ultimate* (C, H, S, N), dan penentuan nilai kalor batubara.

2.6. Slagging and Fouling

Batubara saat ini merupakan salah satu jenis bahan bakar yang banyak digunakan pada pembangkit listrik tenaga uap. Partikulat abu batubara memiliki kemampuan untuk menempel pada dinding boiler dan kemampuan menempelnya abu ini terutama dipengaruhi oleh suhu leleh abu (*ash fusion temperature, AFT*). Ada 2 jenis fenomena menempel nya abu batubara pada dinding boiler, yaitu *slagging* dan *fouling*. *Slagging dan fouling* adalah fenomena dimana abu batubara menempel dan terakumulasi, yang meleleh pada pipa boiler. Kedua masalah ini sangat penting karena dapat berdampak signifikan pada pengoperasian boiler, seperti; masalah perpindahan panas, kehilangan daya boiler, pipa tersumbat dan kerusakan pipa. *Slagging* adalah fenomena di mana partikel abu batubara dalam bentuk padat dan cair menempel pada permukaan dinding konduktif termal yang terletak di zona pembakaran suhu tinggi. *Fouling* adalah fenomena menempel dan

menumpuknya abu pada dinding terpat terjadinya perpindahan panas (*super heater maupun re-heater*). Terbentuknya *slagging* dan *fouling* pada dinding dan tube akan mempengaruhi proses perpindahan panas pada boiler, peningkatan konsumsi bahan bakar, dengan tentunya dapat menyebabkan turunnya efisiensi dari boiler. Gambar II. 5 menunjukkan bahawa pada proses pembakaran batubara selain menghasilkan panas juga menghasilkan partikulat abu yang terbawa bersama gas panas. Metode evaluasi indeks *slagging* dan *fouling* menggunakan analisa karakteristik batubara melalui perhitungan indeks *slagging* dan *fouling*. Analisa karakteristik batubara dengan menggunakan analisis komposisi abu (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , TiO_2 , MnO_2), *ash fusion temperature*, analisis *proximate* (kadar air, abu, zar terbang, dan karbon padat), analisis *ultimate* (C, H, S, N), dan penentuan nilai kalor batubara.



Gambar 2. 6 Combustion zone (Tańczuk et al., 2018)

Ash fusion temperature (AFT) merupakan parameter yang menandakan kisaran suhu di mana endapan abu terbentuk pada permukaan penyerap panas dari peralatan proses (Tambe *et al.*, 2018).

Untuk mengetahui potensi *slagging* dan *fouling* pada umumnya dilakukan analisa bahan bakar di laboratorium. Risiko *slagging* dapat digambarkan oleh karakteristik *ash fusion temperature of sintering, softening, melting dan flowing*. Untuk memprediksi dengan tepat ash fusibility dibuat beberapa korelasi antara

fusion temperatures dan komposisi kimia abu dalam bentuk oksida. Parameter yang sering digunakan untuk menentukan potensi terbentuknya slagging adalah seperti berikut:

A. Base to acid ratio

Komposisi abu merupakan indicator yang baik dalam permasalahan sifat biomassa. Oksida dalam abu dapat dikategorikan menjadi asam (SiO₂, Al₂O₃, TiO₂) dan basa (Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O). potensi pengendapan abu dapat dievaluasi dengan menggunakan rasio *base to acid* (B/A). Rasio ini merupakan indikasi fusion characteristic dan potensi slagging abu dan logam yang mengandung abu yang bergabung didalam proses pembakaran dan membentuk garam bertitik leleh rendah. Rasio B/A dapat dihitung menggunakan rumus:

$$B/A = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + AlO_3 + TiO_2} \dots\dots\dots (1)$$

Dimana:

- B/A : Base to acid
- Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O : Konsentrasi oksida basa
- SiO₂, AlO₃, TiO₂ : Konsentrasi oksida asam

Dari perhitungan rumus tersebut, terdapat nilai standar B/A ratio dapat dikategorikan ke 3 level, yaitu:

1. B/A < 0.4 kategori low
2. B/A > kategori medium
3. B/A antara 0.4 – 0.7 kategori high atau severe

B. Slagging index

Slagging adalah fenomena menempelnya partikel abu batubara baik yang berbentuk padat maupun leburan, pada permukaan dinding penghantar panas yang terletak di zona radiasi panas atau gas pembakaran suhu tinggi (high temperature combustion gas zone),

sebagai akibat dari proses pembakaran batubara ketika suhu gasnya melebihi temperature lebut abu (*ash softening temperature*). Ketebalan lapisan abu yang ini biasanya tidak sampai pada tingkat yang mengganggu performa dinding penghantar panas. Abu dapat dihilangkan dengan penempatan *sootblower* didalam tungku secara tepat. Karakteristik *slagging* ditentukan berdasarkan perhitungan rasio unsur alkali terhadap unsur asam, dengan kadar sulfur

$$Rs \text{ (Slagging Index)} = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + AlO_3 + TiO_2} \times S \dots\dots\dots (2)$$

Dimana:

- Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O : Konsentrasi oksida basa
- SiO₂, AlO₃, TiO₂ : Konsentrasi oksida asam
- S : Total sulfur

Dari perhitungan rumus tersebut, terdapat nilai standar Rs (Slagging Index) dapat dikategorikan ke 4 level, yaitu:

1. Rs < 0.6 kategori low
2. Rs antara 0.6 – 2 kategori medium
3. Rs antara 2.0 – 2.6 kategori high
4. Rs > 2.6 kategori severe

C. Fouling index

Merupakan endapan kering dari partikel abu atau hasil kondensasi komponen anorganik yang mudah menguap pada permukaan heat transfer. Fouling index (Rf) dari bahan bakar padat merupakan alat ukur dari kecenderungan terbentuk nya fouling yang dapat dihitung menggunakan rumus:

$$Rf \text{ (Fouling Index)} = \frac{B}{A} \times (Na_2O + K_2O \dots\dots\dots) \dots\dots\dots (3)$$

Dimana:

- Rf : Fouling index
- B/A : Base to acid ratio

Na_2O , K_2O : Konsentrasi oksida basa

Dari perhitungan rumus tersebut, terdapat nilai standard Rf dapat dikategorikan ke 4 level, yaitu:

1. $R_f < 0.2$ Kategori low
2. Rf antara 0.2 – 0.5 kategori medium
3. Rf antara 0.5 – 1.0 kategori high
4. Rf . 1.0 kategori severe