



PEMANFAATAN BATUBARA DAN LIMBAH ABU BATUBARA

Oleh:
Nurkhamim
Imelia Rizna Wardani
Dwi Poetranto WA
Jaka Purwanta

LPPM UPN "Veteran" Yogyakarta

PEMANFAATAN BATUBARA DAN LIMBAH ABU BATUBARA

Penyusun :

Dr. Nurkhamim, ST, MT Ir

Ir. Dwi Poetranto WA, MT

Dr. Jaka Purwanta, ST, MSi. C.EIA

Imelia Rizna Wardani

E-mail : nurkhamim@upnyk.ac.id

Editor :

Imelia Rizna Wardani

Eka Malinda

Penerbit:

LPPM Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta

Jl. Padjajaran (SWK) 104 (Lingkar Utara), Condong Catur, Sleman, Yogyakarta
55283



Cetakan pertama : Desember 2023

Hak Cipta tahun 2023 diberikan kepada Nurkhamim dkk.

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk dan dengan cara apapun tanpa ijin tertulis dari penulis.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas karuniaNya, sehingga penulis dapat menyelesaikan buku ini. Adapun tujuan dari disusunnya buku ini adalah untuk memberi wawasan bahwa pemanfaatan batubara selama ini tidak hanya digunakan sebagai *steam coal* (batubara uap) untuk PLTU saja tetapi pemanfaatan lebih lanjut, atau dikenal sebagai hilirisasi batubara, seperti untuk bahan bakar cair, bahan bakar gas, hingga material cerdas. Juga mengulas tentang pemanfaatan abu sisa pembakaran batubara dari PLTU yang dikenal sebagai *fly ash* dan *bottom ash* (FABA)

Pada bagian awal buku ini diulas tentang karakteristik batubara, mulai dari genesanya, sifat-sifat fisik dan kimia batubara dan analisis batubara. Di bagian tengah buku dibahas tentang pemanfaatan batubara secara luas, dan di bagian akhir dibahas tentang pemanfaatan FABA.

Tersusunnya buku ini tentu bukan dari usaha penulis seorang. Dukungan moral dan material dari berbagai pihak sangatlah membantu tersusunnya buku ini. Untuk itu, penulis ucapkan terima kasih kepada keluarga, sahabat, rekan-rekan, dan pihak-pihak lainnya yang membantu secara moral dan material bagi tersusunnya buku ini.

Buku yang tersusun ini tentu masih jauh dari lengkap. Untuk itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk melengkapi buku ini terutama untuk penerbitan selanjutnya.

Yogyakarta, Desember 2023

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	iv
BAGIAN 1 PEMBENTUKAN GAMBUT DAN BATUBARA	1
1.1. Pendahuluan	1
1.2. Pembentukan Gambut	1
1.3. Lingkungan Pembentukan Gambut atau Batubara	3
1.4. Pembentukan Batubara	6
BAGIAN 2 SIFAT DAN KUALITAS BATUBARA	11
2.1. Pengertian Batubara	11
2.2. Sifat dan Kualitas Batubara	13
2.3. Karakteristik Abu Batubara	31
2.4. Kandungan Sulfur	35
2.5. Sifat-sifat Plastis Batubara	37
2.6. Sifat Muai (Swelling)	37
BAGIAN 3 PREPARASI DAN PENGOLAHAN BATUBARA	38
3.1. Reduksi Ukuran Butir	39
3.2. Coal Washing Plant	39
BAGIAN 4 PENGEMBANGAN DAN PEMANFAATAN BATUBARA	44
4.1. Pemanfaatan Batubara Sebagai Sumber Energi	44
4.2. Pengembangan Pemanfaatan Batubara Lanjut	68
BAGIAN 5 PEMANFAATAN LIMBAH ABU BATUBARA (FABA)	82
5.1. Pendahuluan	82
5.2. Pemanfaatan FABA di Indonesia	86
DAFTAR PUSTAKA	91
GLOSARIUM	91
INDEKS	100

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1.1. Contoh evolusi mire yang menunjukkan pembentukan raised mire (raised bog). Tipe gambut akan mengalami zonasi secara vertikal karena evolusi tersebut (McCabe, 1987).	2
1.2. Skema lingkungan transisi lower delta plain (Thomas, 2002)	5
1.3. Skema lingkungan transisi upper delta plain - fluvial (Thomas, 2002)	5
1.4. Beberapa perubahan sifat batubara seiring proses pematubaraan (Taylor et al., 1998).	7
1.5. Skema proses pematubaraan (Van Krevelen, 1992 dengan perubahan).	7
1.6. Contoh klasifikasi peringkat batubara berdasarkan beberapa parameter utama (Daulay, 2000).	8
1.7. Beberapa bentuk splitting: (a) simple splitting, (b) multiple splitting, (c) Z / S shape splitting (Thomas, 2002).	9
1. 8. Beberapa bentuk channeling (washout) pada lapisan batubara	10
2.1. Foto sayatan tipis batubara yang menunjukkan adanya pirit	18
2.2. Model pembentukan pirit pada batubara	19
2.3. Penampakan mineral matter pada batubara	22
2.4. Perubahan kerucut abu batubara pada saat dipanaskan	23
2.5. Hardgrove Grindability Index Machine	24
3.1. Salah satu model Coal Washing Plant (https://mineraldressing.com/solution/coal-processing-plant)	39
3.2. Metode coning-and-quartering pada dried coal samples (kiri) dan grinded coal samples (kanan)(Pradan & Muhanta, 2020)	41
3.3. Ilustrasi representasi metode float-and-sink untuk pemisahan batubara berdasarkan berat jenis (Pradan & Muhanta, 2020)	42
4.1. Konsumsi Batubara untuk PLTU	45
4.2. Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU) Tanjung Jati B Jepara Jawa Tengah	45
4.3. Skema boiler secara umum (Wiratama, 2020)	50
4.4. Coal (PC) Boiler Batubara (Rakhman, 2020)	53
4.5. Layout Circulating Fluidized Boiler (CFB) (Rakhman, 2020)	53
4.6. Skema Balanced Draft Boiler (Rakhman, 2020)	54
4.7. Fire Tube Boiler (Rakhman, 2020)	54

4.8. Water Tube Boiler (Rakhman, 2020)	55
4.9. Boiler Tipe FBC (Rakhman, 2020)	55
4.10. Layout boiler tipe AFBC (Rakhman, 2020)	56
4.11. Layout Boiler tipe PFBC (Rakhman, 2020)	56
4.12. Layout Boiler tipe CFBC (Rakhman, 2020)	57
4.13. Semen digunakan sebagai bahan perekat batubata, paving block dan lain sebagainya.	58
4.14. Alur proses pembuatan semen (Encyclopedia Britanica, Inc. 2007)	63
4.15. Rotary kiln pada suatu pabrik semen	67
4.16. Skema Rotary Kiln	68
4.17. Diagram Alir Haber-Bosch Synthesis Loop	71
4.18. Diagram Metode Produksi Ammonia dari Beberapa Sumber Energi	72

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1. Kandungan Abu dalam Batubara	15
2.2. <i>Fuel Ratio</i> Berbagai Jenis Batubara	16
4.1. Spesifikasi DME Dibandingkan dengan Bahan Bakar Jenis Lain	69
4.2. Ringkasan Perbandingan Pencairan Batubara dengan Teknologi Pirolisis	73
4.3. Konsumsi Penggunaan Briket Batubara di Jawa & Bali	74
4.4. Spesifikasi Batubara Indonesia dan Australia di PT Krakatau Steel	76
4.5. Perbedaan Proses UBC dan CDB	78
5.1. Karakteristik Fisik dan Kimia dari Hasil Uji FABA PLTU (Naresh, 2010)	83
5.2. Syarat Fisik Bata Beton (SNI 03-0349-1989)	87

BAGIAN 1

PEMBENTUKAN GAMBUT DAN BATUBARA

1.1. PENDAHULUAN

Batubara dapat dikategorikan sebagai salah satu batuan sedimen yang kaya akan material organik. Cook & Sherwood (1991) mengemukakan bahwa suatu deposit bisa disebut sebagai batubara jika kandungan material organiknya lebih dari 80%. Deposit batubara merupakan hasil akhir dari suatu efek kumulatif proses pembusukan dan penguraian tumbuhan, deposisi dan pembebanan sedimen, proses endogenik seperti pergerakan kerak bumi dan proses eksogenik contohnya erosi.

1.2. PEMBENTUKAN GAMBUT

Pembentukan gambut merupakan tahap awal terbentuknya batubara. Dalam konteks ilmiah geologi batubara, tempat/lahan basah atau ekosistem dimana gambut terakumulasi disebut sebagai suatu *mire* (Gore, 1983). Secara umum *mire* dapat dibedakan menjadi (1) *topogenous mire* dimana pembentukan gambut terjadi pada suatu level air yang tinggi dan (2) *ombrogenous mire (raised bog)* dimana level air berada di bawah permukaan gambut dan gambut memperoleh air terutama dari air hujan. Thomas (2002) menunjukkan bahwa pembentukan endapan gambut pada prinsipnya dipicu oleh adanya:

- Terrestrialisasi yaitu pembentukan suatu *mire* pada tubuh air yang sudah ada (misalnya pada danau, lagun, dll)
- Paludifikasi yaitu pembentukan suatu *mire* di tanah/lahan kering, misalnya akibat adanya kenaikan muka air.

Contoh yang menunjukkan pembentukan *raised mire (raised bog)* ditunjukkan pada Gambar 1.1.

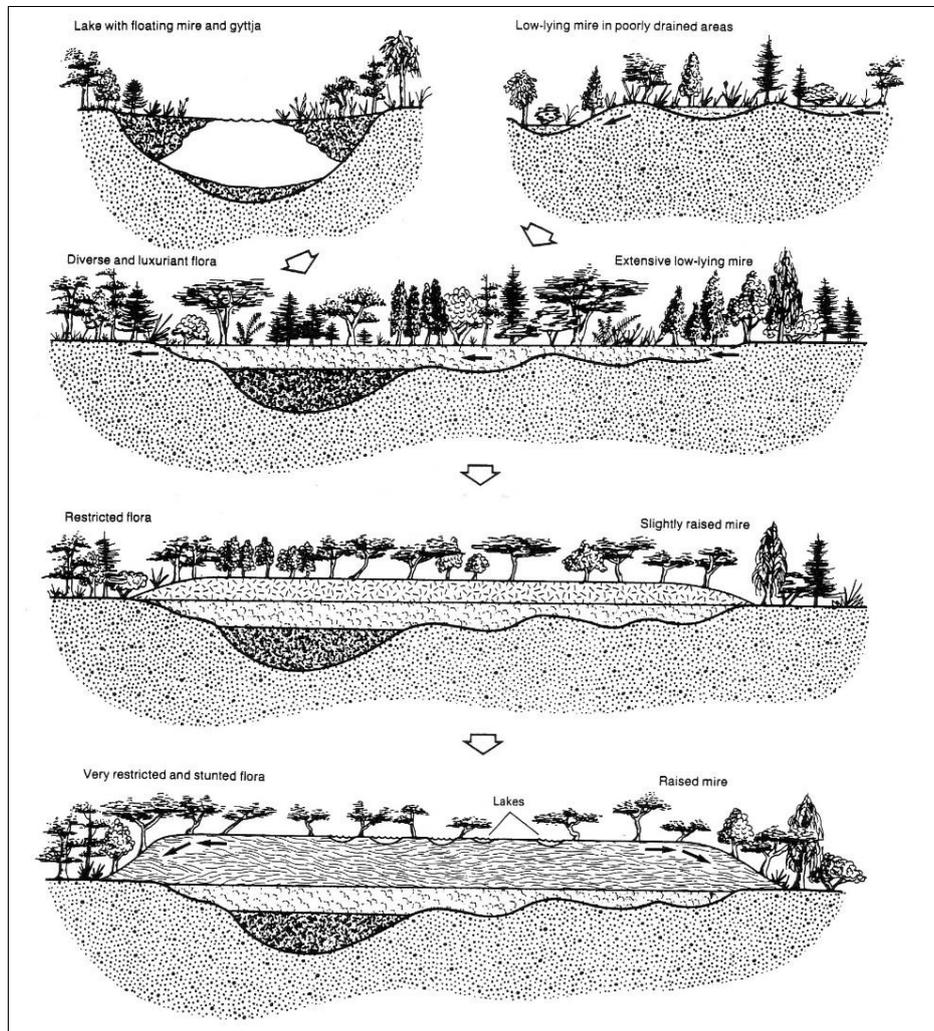
Pembentukan *mire* dan karakteristik gambut yang dihasilkan tergantung dari beberapa faktor yaitu (a) evolusi tumbuhan, (b) iklim dan (c) paleogeografi dan struktur geologi daerah.

a. Evolusi tumbuhan

Tumbuhan yang kita kenal pada saat ini telah mengalami evolusi yang sangat kompleks sejak Jaman Devon. Pada jaman Devon Bawah baru terdapat jenis tumbuhan bawah air yang tumbuh terutama pada lagun yang dangkal. Oleh karena itu lapisan batubara yang berumur Devon umumnya hanya tipis-tipis (contohnya di Schiefergebirge, Jerman).

Tumbuhan pembentuk batubara yang signifikan baru muncul pada Jaman Karbon yaitu berupa tumbuhan dari keluarga paku-pakuan (*Pteridophyta*) seperti *Lepidodendron* dan *Sigilaria* yang tingginya bisa mencapai 30 m lebih. Tumbuhan tersebut tumbuh pada suatu hutan rawa dan menghasilkan lapisan batubara yang sangat tebal seperti di Ruhr-Jerman.

Pada Jaman Jura dan Kapur Bawah, tumbuhan Gymnosperma mulai mendominasi dan juga membentuk lapisan batubara yang sangat tebal terutama di daerah Asia Tengah dan Siberia.



Gambar 1.1. Contoh evolusi *mire* yang menunjukkan pembentukan *raised mire (raised bog)*. Tipe gambut akan mengalami zonasi secara vertikal karena evolusi tersebut (Mc. Cabe, 1987).

Tumbuhan *angiosperma* yang pada saat ini mendominasi ekologi tumbuhan di daerah tropis termasuk di Indonesia baru muncul pada Jaman Kapur Atas. Perkembangan *angiosperma* yang pesat di Jaman Kapur Tengah dan Atas serta awal Tersier menyebabkan terbentuknya deposit batubara yang sangat tebal misalnya di Amerika Utara dan Australia. Pada saat ini, rawa gambut yang ada di Indonesia didominasi oleh tumbuhan hutan seperti *gonystylus*, *dactylocladus*, *shorea*, dll dan juga tumbuhan rawa seperti *Pandanus* (Anderson, 1983).

b. Iklim

Iklim tropis secara umum akan membantu pertumbuhan gambut yang lebih cepat karena kecepatan pertumbuhan suatu tumbuhan lebih cepat dan dengan ragam yang lebih banyak.

Hal ini juga didukung oleh temperatur yang hangat dan kondisi dengan kelembaban cukup tinggi. Rawa di daerah tropis bisa menghasilkan kayu dengan ketinggian mencapai 30 m hanya dalam waktu 7-9 tahun sedangkan tumbuhan di daerah rawa dengan iklim sedang hanya menghasilkan tumbuhan dengan tinggi 5-6 m dalam jangka waktu yang sama. Walaupun demikian temperatur yang tinggi juga menaikkan tingkat dekomposisinya.

Raised bog merupakan suatu endapan gambut yang permukaannya berbentuk konveks dan umumnya merupakan penciri daerah humid dimana tingkat curah hujannya melebihi evaporasinya. Di daerah tropis seperti Indonesia, gambut dengan bentuk *raised bog* ini umum ditemukan dengan ciri vegetasi seperti tersebut di atas.

c. Paleogeografi dan Struktur Geologi (Tektonik) Daerah

Taylor et al (1998) mengemukakan bahwa syarat terbentuknya suatu deposit gambut yang tebal adalah:

- kenaikan muka air yang lambat sehingga hubungan posisi antara permukaan gambut dan muka air dapat bertahan dalam waktu yang cukup lama
- *mire* terlindung dari pembanjiran air laut (misalnya dilindungi oleh pantai, gosong pasir, dll) atau pembanjiran air sungai (misalnya dilindungi oleh *natural levees*)
- kondisi fisiografis sehingga gambut dapat terbentuk dalam waktu yang lama tanpa adanya interupsi sedimen fluvial.

Jika muka air naik terlalu cepat (misal oleh karena penurunan cekungan/*subsidence* yang cepat atau pada daerah paralik, gambut akan tenggelam dan sedimen limnik atau laut akan terdeposisi. Sebaliknya jika penurunan cekungan terlalu lambat (jauh lebih lambat dari pembentukan gambut) maka gambut akan rusak karena teroksidasi dan tererosi.

Deposit gambut terbentuk dengan baik pada daerah yang mengalami penurunan cekungan. Dengan demikian formasi pembawa batubara yang tebal umumnya terdapat pada daerah dekat busur pegunungan (terutama di posisi *foredeep*) dan cekungan belakang busur (*back arc*). Sebagai contoh adalah pembentukan batubara di Indonesia yang terjadi di bagian *foredeep* Busur Sunda. Formasi-formasi pembawa batubara yang berumur Tersier dapat mencapai ketebalan lebih dari 13.000 m.

1.3. LINGKUNGAN PENGENDAPAN GAMBUT ATAU BATUBARA

Deposit gambut yang kemudian menjadi batubara dapat diendapkan dalam 2 cara yaitu secara *autochthonous (in situ)* dan *allochthonous*. Deposit gambut yang bersifat *autochthonous (in situ)* terbentuk di lokasi dimana tumbuhan itu tumbuh. Jadi material pembentuk gambut tidak mengalami transportasi melainkan langsung terakumulasi. Gambut yang bersifat *allochthonous* adalah gambut yang material penyusunnya berasal dari tempat lain. Jadi tumbuhan yang tumbuh di suatu tempat setelah mati akan terbawa oleh media transport air menuju suatu lingkungan dimana material tumbuhan itu kemudian terdeposisi. Gambut/batubara yang dihasilkan umumnya memiliki kandungan kotoran (abu) yang banyak karena pada saat pengendapan terjadi pula pengendapan sedimen klastik.

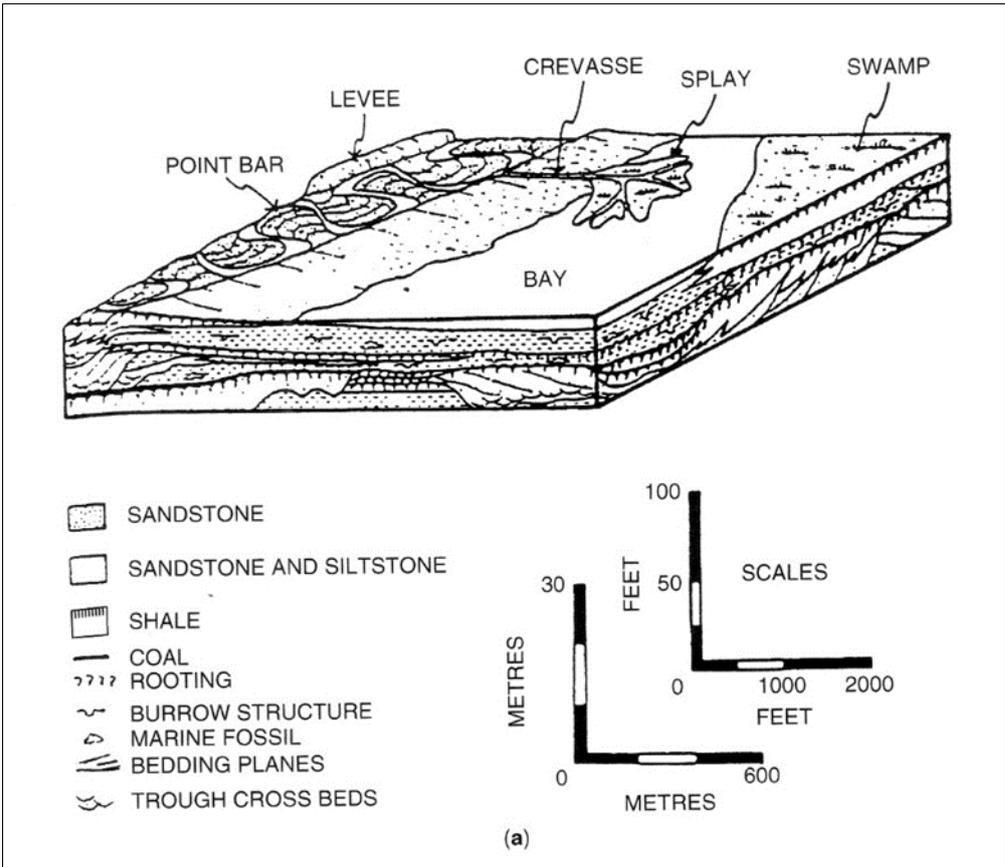
Secara umum lingkungan pembentuk batubara dapat dibedakan menjadi 2 kelompok yaitu (1) lingkungan paralik atau *marginal marine* (daerah pesisir) dan (2) lingkungan limnik atau air tawar. Pada lingkungan paralik atau *marginal marine*, terdapat beberapa sub-lingkungan dimana batubara umum terbentuk, yaitu pada:

- estuarin, lagun dan teluk: pada lingkungan ini terjadi deposisi sedimen klastik dan material organik dari *marsh/swamp* (paya/rawa) di sekitarnya serta kontribusi alga *in situ*.
- *coastal marsh*: lingkungan ini berada pada daerah rendah di belakang gosong pantai sehingga terpisah dari laut. Akan tetapi pada saat terjadi pasang tinggi dan badai, *coastal marsh* secara periodik dipengaruhi oleh air laut. Tumbuhan yang terdapat pada lingkungan ini adalah tumbuhan yang mampu beradaptasi dengan berbagai kondisi salinitas. Tumbuhan yang umumnya ditemukan pada *coastal marsh* daerah tropis adalah berupa *mangrove*.
- *Lower delta plain marsh/swamp*: fasies ini terutama berupa daratan/pulau interdistributer yang ditumbuhi tumbuhan (*mangrove*) pada delta bagian depan yang berhadapan dengan laut. Pada saat terjadi pasang tinggi dan badai, air laut yang masuk dapat menyebabkan penambahan sulfur sehingga menyebabkan terbentuknya deposit gambut yang kaya akan pirit. Selain itu pada saat banjir, sedimen berbutir halus dapat diendapkan bersama material tanaman sehingga terbentuk gambut yang kandungan abunya tinggi.

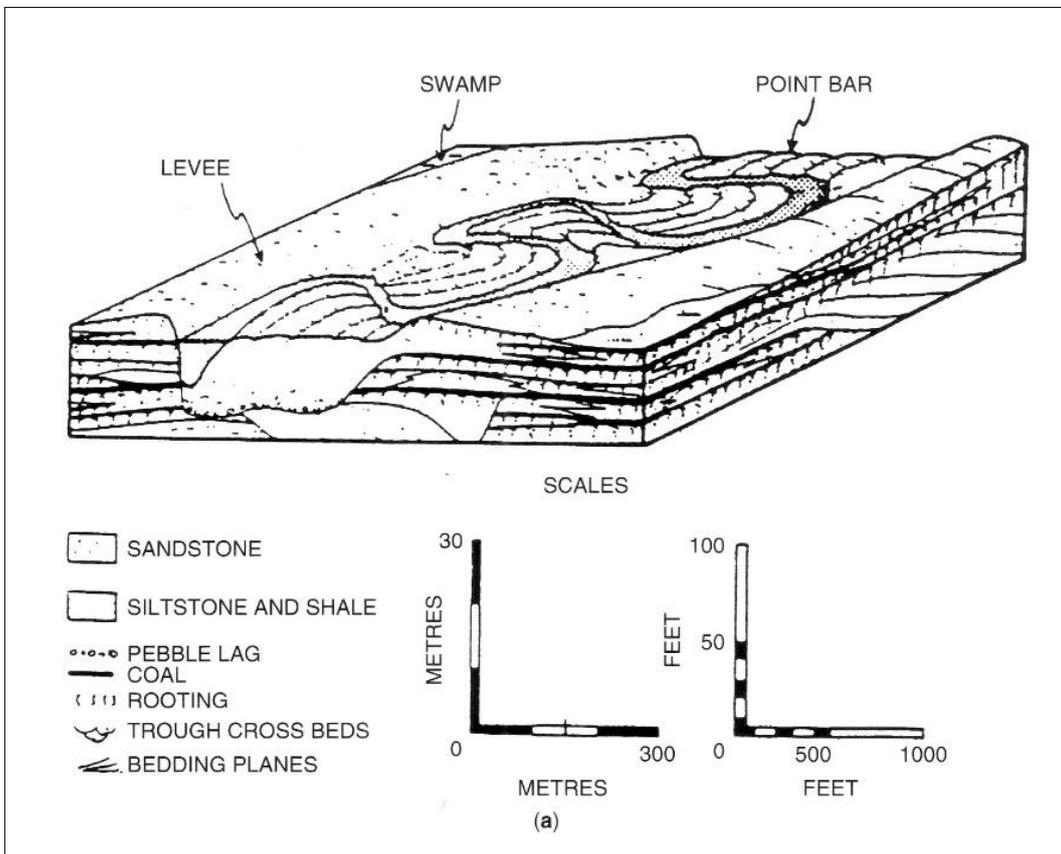
Lingkungan limnik atau air tawar merupakan lingkungan yang didominasi oleh air tawar (atau di atas level pasang tertinggi) dan tidak memiliki hubungan hidrologis secara langsung dengan laut. Sub-lingkungan yang membentuk deposit batubara adalah:

- *fluvial swamp* (termasuk *upper delta plain swamp*): rawa fluvial banyak terdapat pada dataran banjir fluvial oleh karena terlindung dari suplai sedimen oleh adanya *levee* sepanjang teras sungai. Gambut/batubara yang dihasilkan dapat berselang-seling dengan lapisan pasir atau lempung yang terbawa oleh adanya banjir. Kadang pembentukan gambut pada lingkungan ini juga diselingi dengan adanya fasies danau.
- danau: pembentukan gambut terutama terjadi pada pinggir danau, sedangkan pada posisi yang lebih dalam terbentuk lumpur organik oleh karena minimnya sirkulasi air.
- *upland bog*: gambut juga dapat terbentuk pada lingkungan yang tidak secara langsung berhubungan dengan kondisi fluviatil, akan tetapi tetap terjadi drainasi dan akumulasi material klastik tidak terlalu banyak melampaui akumulasi tumbuhan.

Secara skematis contoh rekonstruksi lingkungan pengendapan batubara dapat dilihat dari pada Gambar 1.2 dan Gambar 1.3.



Gambar 1.2. Skema lingkungan transisi *lower delta plain* (Thomas, 2002)



Gambar 1.3. Skema lingkungan transisi *upper delta plain - fluvial* (Thomas, 2002)

1.4. PEMBENTUKAN BATUBARA

Batubara dapat dikatakan merupakan hasil “pemfosilan” tumbuhan. Pada saat pembentukan batubara terjadi proses perubahan secara kimiawi maupun fisik material tumbuhan. Penyusun jaringan tumbuhan dilihat secara kimiawi adalah berupa molekul-molekul karbohidrat, lignin dan lignan, protein, lipoid serta resin yang kemudian akan mengalami perubahan kimiawi. Jaringan-jaringan pada tumbuhan secara fisik akan berubah menjadi maseral (maseral akan dibahas kemudian). Tingkat transformasi atau pembatubaraan dikenal sebagai peringkat batubara.

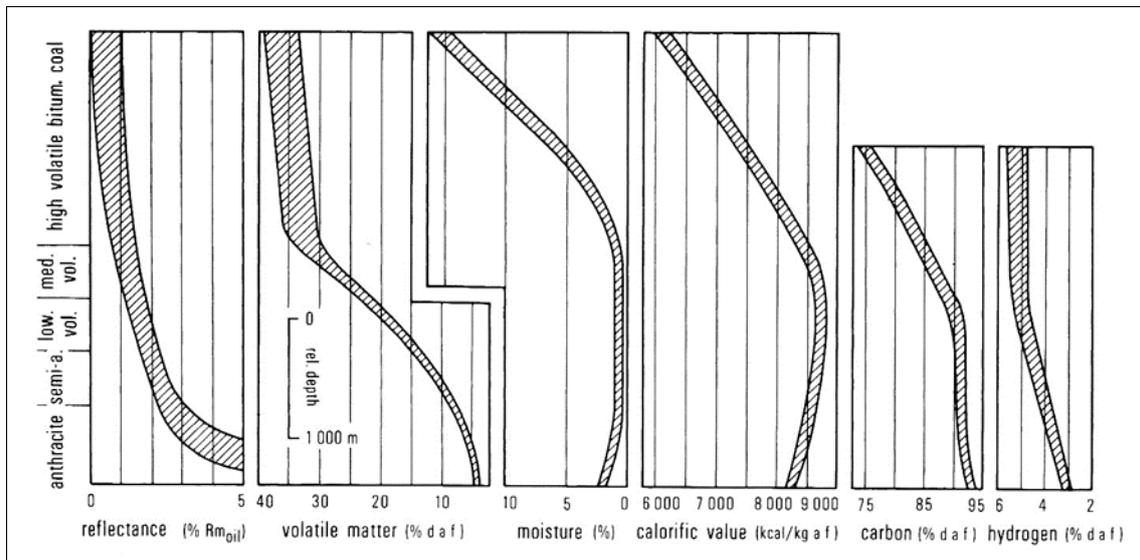
Pembentukan batubara secara sederhana terdiri dari proses penggabutan (*peatification*) dan pembatubaraan (*coalification*). Proses yang terjadi pada pembentukan batubara secara skematis dapat dilihat pada Gambar 1.5. Proses pembentukan batubara diawali dengan fase biokimia dan kemudian diikuti fase geokimia atau metamorfisme. Fase biokimia terjadi pada gambut segera setelah deposisi dan pengendapan sedimen lain di atas gambut tersebut (atau selama diagenesis). Proses biokimia yang intensif terjadi hanya pada kedalaman yang dangkal (umumnya <10m), terutama dalam bentuk aktifitas bakterial yang menguraikan gambut. Proses ini dipengaruhi oleh tingkat pembebanan sedimen, pH dan tinggi muka air.

Pada batubara peringkat rendah, alterasi material organik terjadi dengan sangat intensif oleh karena adanya perubahan temperatur dan tekanan. Pada tahap geokimia atau metamorfisme ini, terjadi peningkatan kandungan karbon dan penurunan kandungan hidrogen dan oksigen karena adanya pelepasan lengas (*volatile matter*). Bersamaan dengan pengurangan kandungan air dan kompaksi, proses tersebut menyebabkan terjadinya penurunan volume batubara. Produk dari proses pembatubaraan ini terutama adalah gas metan, karbon dioksida dan air.

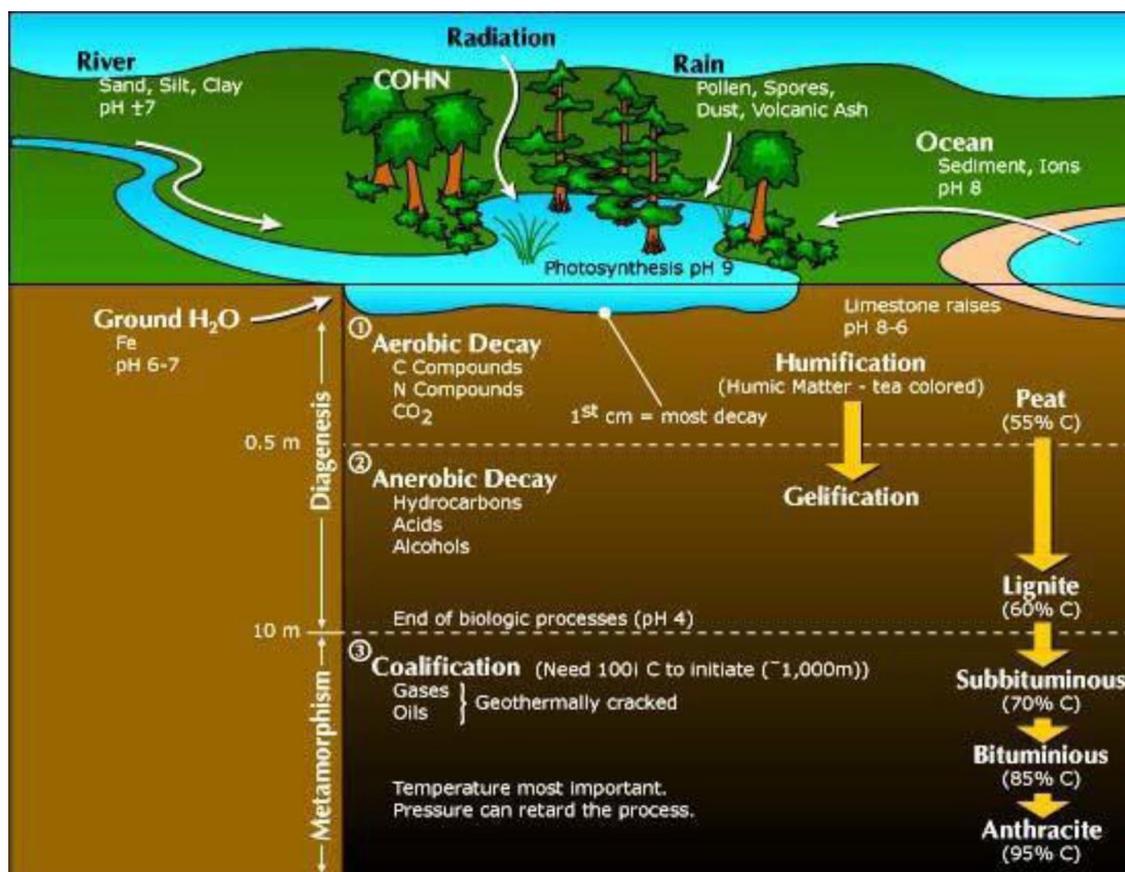
Proses pembatubaraan disebabkan oleh adanya peningkatan temperatur dan tekanan serta waktu. Peningkatan temperatur dapat terjadi oleh karena (1) peningkatan kedalaman pembebanan atau (2) kontak batubara dengan sumber panas terutama berupa intrusi batuan beku. Tingkat penambahan peringkat (dikenal sebagai gradien peringkat) tergantung pada gradien geothermal cekungan serta konduktivitas panas batuan.

Waktu berhubungan dengan berapa lama pembatubaraan terjadi. Semakin lama waktu maka semakin tinggi temperatur yang bekerja. Pengaruh tekanan yang sangat besar terjadi pada saat kompaksi seperti dengan adanya pengurangan porositas dan kandungan *moisture*.

Seperti telah dikemukakan di atas, terjadinya proses pembatubaraan, terjadi adanya perubahan parameter batubara baik yang berupa sifat fisik maupun kimia. Gambar 1.4 menunjukkan beberapa parameter utama yang berubah selama terjadinya proses pembatubaraan. Parameter-parameter tersebut yang saat ini umum digunakan untuk menentukan peringkat batubara.



Gambar 1.4. Beberapa perubahan sifat batubara seiring proses pembatubaraan (Taylor et al., 1998).



Gambar 1.5. Skema proses pembatubaraan (Van Krevelen, 1992 dengan perubahan).

Rank Stages	%R _v max Vitrinite	AUST AS Coal class	V.M. ¹ daf Vitrinite	S.E. daf whole coal MJ/kg	AUST AS	Moisture ² at Vitrinite	C daf Vitrinite	C.V. daf whole coal Kcal/kg	Sporinite fluorescence max nm	GERMANY DIN	USA ASTM	USSR
Peat	0.2		68			75	60	2000	500 to 600	Peat	Peat	
Brown	0.3		64	8.38		55		3000		Soft	Lightite	B1
Coal			60	12.56		35	70	4000		Mat		B2
Sub-Bitum	0.4		52	20.93		25	71	5000		Brown Coal	Sub-Bitum	B3
Bitum	0.5	9	48	27.08		10	77	6000	-580	Bright	Bitum	D
	0.6	8	44	28.42				7000		Flame		
High	0.7		40	32.02			80	8000	590 to 630	Gas-Flame		G
Volatille Bitum	0.8	7	36	33.82		2.0	84		660 to 675	Gas		J
	0.9	6	32							Hard Coal		
	1.0	5			HARD							
Medium Volatille Bitum	1.2		28	36.22			87	8650		Gas	Medium Volatille Bitum	K
	1.5	4B	24		COAL					Fat		
		4A	20							Ess		
Low Volatille Bitum	2.0	3	16				90			Lean	Low Volatille Bitum	OS
Semi-Anthracite	2.5	2	12							Anthracite	Semi Anthracite	T
			8	36.22			92	8650	No detectable fluorescence	Anthracite	Anthracite	PA
Anthracite	3.0	1	4				94.5			Meta Anthracite	Anthracite	
Meta Anthra	5.0									Meta Anthracite	Meta Anthra	A

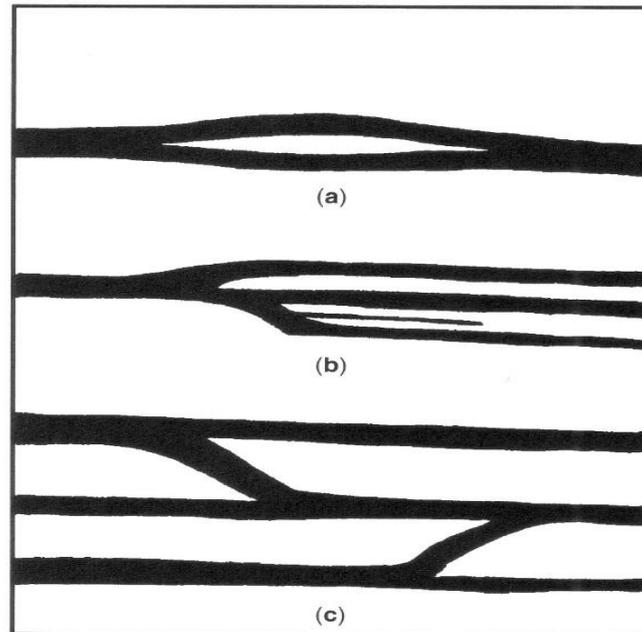
Gambar 1. 6. Contoh klasifikasi peringkat batubara berdasarkan beberapa parameter utama (Daulay, 2000).

1.5. PENGARUH PROSES GEOLOGI TERHADAP DISTRIBUSI LAPISAN BATUBARA

Selama pembentukan batubara terjadi interaksi dengan berbagai macam proses geologi yang dapat menyebabkan adanya variasi distribusi lapisan batubara. Proses tersebut antara lain menyebabkan terjadinya *splitting*, *washouts* dan *floor rolls*. Selain itu struktur

geologi dapat menghasilkan perubahan distribusi *seam* baik secara lateral maupun vertikal.

Splitting adalah fenomena dimana lapisan batubara terbagi menjadi 2 lapisan atau lebih. Material (sedimen) bukan batubara yang memisahkan lapisan tersebut dikenal sebagai *parting* atau *band*. *Parting* atau *band* merupakan hasil deposisi material klastik yang menggantikan akumulasi material organik. Material tersebut dapat dihasilkan oleh karena pembanjiran *mire* oleh air sungai atau air laut secara periodik.



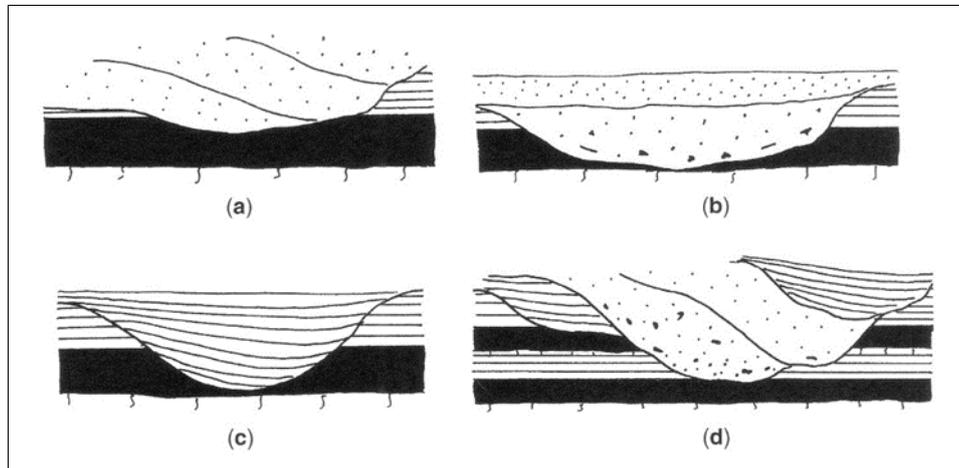
Gambar 1.7. Beberapa bentuk *splitting*: (a) *simple splitting*, (b) *multiple splitting*, (c) *Z/S shape splitting* (Thomas, 2002).

Washout terbentuk pada saat lapisan batubara tererosi oleh gelombang atau arus dan kemudian terisi oleh sedimen. *Washout* merupakan masalah besar dalam operasi penambang karena dapat mengurangi secara signifikan jumlah batubara yang tertambang.

Floor rolls adalah kenampakan dimana material batuan menyodok/menembus lapisan batubara ke atas dari bawah. Hal ini terjadi karena kompaksi gambut/batubara tidak terjadi pada tingkat yang sama sehingga terdapat bagian lapisan yang lebih atau kurang tertekan dibandingkan bagian lapisan yang lain.

Struktur geologi yang berpengaruh terhadap distribusi lapisan batubara dapat bersifat *syndepositional* (bersamaan dengan akumulasi gambut) dan *postdepositional* (sesudah pembentukan lapisan gambut/batubara). Struktur yang bersifat *syndepositional* terutama terjadi karena kombinasi dari akumulasi sediment yang tebal dan penurunan cekungan yang cukup cepat. Struktur yang mungkin terjadi umumnya berupa *slumping* dan *loading*. Struktur yang sudah ada sebelumnya dan kemudian aktif kembali pada saat deposisi gambut, dapat pula menyebabkan terjadinya perubahan distribusi lapisan oleh karena deposisi lapisan gambut akan mengikuti perubahan dasar pengendapan. Seperti sudah diketahui struktur yang bersifat *postdepositional* seperti pensesaran dan perlipatan akan

menyebabkan distribusi lapisan yang bervariasi dan dapat berubah-ubah dari satu tempat lain.



Gambar 1. 8. Beberapa bentuk *channeling (washout)* pada lapisan batubara. (a) *channel* yang terisi pasir membentuk atap pada lapisan batubara, (b) *channel* yang terisi pasir material rombakan lain mengerosi lapisan batubara, (c) *channel* yang terisi *mudstone* mengerosi lapisan batubara, (d) multiple channel sequence yang mengerosi lapisan batubara (Thomas, 2002).

Floor rolls adalah kenampakan dimana material batuan menyodok/menembus lapisan batubara ke atas dari bawah. Hal ini terjadi karena kompaksi gambut/batubara tidak terjadi pada tingkat yang sama sehingga terdapat bagian lapisan yang lebih atau kurang tertekan dibandingkan bagian lapisan yang lain.

Struktur geologi yang berpengaruh terhadap distribusi lapisan batubara dapat bersifat *syndepositional* (bersamaan dengan akumulasi gambut) dan *postdepositional* (sesudah pembentukan lapisan gambut/batubara). Struktur yang bersifat *syndepositional* terutama terjadi karena kombinasi dari akumulasi sediment yang tebal dan penurunan cekungan yang cukup cepat. Struktur yang mungkin terjadi umumnya berupa *slumping* dan *loading*. Struktur yang sudah ada sebelumnya dan kemudian aktif kembali pada saat deposisi gambut, dapat pula menyebabkan terjadinya perubahan distribusi lapisan oleh karena deposisi lapisan gambut akan mengikuti perubahan dasar pengendapan. Seperti sudah diketahui struktur yang bersifat *postdepositional* seperti pensesaran dan perlipatan akan menyebabkan distribusi lapisan yang bervariasi dan dapat berubah-ubah dari satu tempat lain.

BAGIAN 2

SIFAT DAN KUALITAS BATUBARA

2.1. PENGERTIAN BATUBARA

Batubara dikenal sebagai emas hitam. Masyarakat mengenalnya sebagai batu hitam yang bisa terbakar. Hal itu tidak salah karena tampilan di lapangan menunjukkan perbedaan yang kontras antara batubara dan batuan sekitarnya. Batubara didefinisikan oleh beberapa ahli dan memiliki banyak pengertian di berbagai buku atau referensi. Di komunitas industri, defisi ini lebih spesifik lagi, yaitu batuan yang pada tingkat kualitas tertentu memiliki nilai ekonomi.

Beberapa definisi batubara lain yang digunakan oleh ahli dalam berbagai literatur antara lain:

- a. *The International Hand Book of Coal Petrography* (Hower, 1963) : Batubara adalah batuan sedimen yang mudah terbakar, terbentuk dari sisa-sisa tanaman dalam variasi tingkat pengawetan, diikat oleh proses kompaksi dan terkubur dalam cekungan-cekungan pada kedalaman yang bervariasi, dari dangkal sampai dalam.
- b. Thiessen (1974) : Batubara adalah suatu benda padat yang kompleks, terdiri dari bermacam-macam unsur kimia atau merupakan benda padat organik yang sangat rumit.
- c. Elliot (1981), ahli geokimia batubara, berpendapat batubara merupakan batuan sedimen yang secara kimia dan fisika adalah heterogen yang mengandung unsur-unsur karbon, hidrogen, serta oksigen sebagai komponen unsur utama dan belerang serta nitrogen sebagai unsur tambahan. Zat lain, yaitu senyawa anorganik pembentuk *ash* (debu), tersebar sebagai partikel mineral yang terpisah di seluruh senyawa batubara.
- d. Achmad Prijono, dkk. (1992) : Batubara adalah bahan bakar hydro-karbon padat yang terbentuk dari tumbuh-tumbuhan dalam lingkungan bebas oksigen dan terkena pengaruh temperatur serta tekanan yang berlangsung sangat lama.
- e. SNI 5012:2011 tentang Pedoman Pelaporan Sumberdaya dan Cadangan Batubara, dinyatakan bahwa endapan batubara (*coaldeposit*) adalah endapan yang mengandung hasil akumulasi material organik yang berasal dari bekas tumbuhan yang telah melalui proses penggabutan dan pembatubaraan litifikasi untuk membentuk lapisan batubara. Material tersebut telah mengalami kompaksi, ubahan kimia dan proses metamorphosis oleh peningkatan panas dan tekanan selama periode geologis. Bahan-bahan organik yang terkandung dalam lapisan batubara mempunyai berat lebih dari 50% atau volume bahan organik tersebut, termasuk kandungan lengas bawaan (*inherent moisture*), lebih dari 70%.

Dari beberapa sumber di atas, dapat dirangkum suatu definisi yaitu: *“Batubara adalah berupa sedimen organik bahan bakar hidrokarbon padat yang terbentuk dari tumbuh-tumbuhan yang telah mengalami pembusukan secara biokimia, kimia dan fisika dalam*

kondisi bebas oksigen yang berlangsung pada tekanan serta temperatur tertentu pada kurun waktu yang sangat lama”

Batubara berasal dari tumbuhan yang telah mati dan tertimbun dalam cekungan yang berisi air dalam waktu sangat lama, mencapai jutaan tahun. Inilah yang membedakan batubara dengan minyak bumi, karena minyak bumi berasal dari sumber hewani. Dalam proses pembentukan batubara, banyak faktor yang mempengaruhi. Sebagai contoh, besarnya temperatur dan tekanan terhadap tumbuhan mati akan memengaruhi kondisi lapisan batubara yang terbentuk, termasuk pengayaan kandungan karbon di dalam batubara. Timbunan maerial ini kemudian mengalami proses penggabutan dan pembatubaraan sehingga menjadi batubara. Batubara secara geologi termasuk golongan batuan sediman organoklastik. Lingkungan pembentukan batubara sendiri harus merupakan cekungan anaerob, yaitu tidak ada oksigen yang terlibat dalam prosesnya.

Adapun, apabila ditinjau dari segi sudut pandang berbagai bidang, batubara didefinisikan sebagai berikut :

a. Bidang Ekonomi

Dalam konteks ekonomi, batubara adalah salah satu sumber daya alam yang memiliki nilai ekonomi sebagai bahan bakar utama dalam industri dan pembangkit listrik. Batubara juga dapat dianggap sebagai komoditas perdagangan internasional yang memiliki dampak signifikan terhadap perekonomian suatu negara, baik sebagai sumber pendapatan maupun sebagai komponen biaya produksi.

b. Bidang Lingkungan

Dari perspektif lingkungan, batubara adalah sumber energi yang kontroversial karena pembakarannya menghasilkan emisi gas rumah kaca dan polutan udara seperti sulfur dioksida dan nitrogen oksida. Dampak lingkungan negatif ini telah mendorong peningkatan upaya dalam mengurangi penggunaan batubara dan mengembangkan alternatif energi yang lebih bersih.

c. Bidang Teknik

Dalam bidang teknik, batubara merupakan bahan bakar fosil yang dapat dimanfaatkan dalam berbagai proses industri dan produksi energi. Pemanfaatan teknik batubara melibatkan proses seperti penambangan, transportasi, pengolahan, dan pembakaran dalam pembangkit listrik atau industri tertentu.

d. Bidang Energi

Dalam konteks energi, batubara adalah salah satu sumber energi non-terbarukan yang penting. Pembakarannya menghasilkan panas yang digunakan untuk menghasilkan listrik melalui pembangkit listrik tenaga uap. Meskipun masih menjadi sumber utama energi di banyak negara, ada pergeseran menuju sumber energi terbarukan dan lebih bersih karena kekhawatiran terhadap dampak lingkungan dan ketersediaan yang terbatas.

e. Bidang Kimia

Dalam bidang kimia, batubara terdiri dari berbagai senyawa organik dan anorganik. Proses pembentukan batubara melibatkan dekomposisi tumbuhan purba di bawah tekanan dan panas. Dari sudut pandang kimia, batubara mengandung karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, dan sulfur dalam berbagai bentuk dan proporsi.

2.2. SIFAT DAN KUALITAS BATUBARA

Sifat-sifat fisik ataupun komposisi batubara sangat berbeda beda, apakah masih berbentuk endapan ataupun telah menjadi bahan perdagangan. Perbedaan ini disebabkan oleh kondisi pembentukan gambut, perubahan-perubahan yang terjadi selama masa waktu geologi, cara-cara penambangan dan pengolahan yang telah dialaminya.

Sifat dan kualitas batubara ini menentukan bagaimana batubara tersebut dapat dimanfaatkan. Dalam beberapa hal, pencucian dan pengolahan dapat memperbaiki karakteristik ini, sehingga batubara tersebut menjadi dapat dimanfaatkan. Beberapa karakteristik batubara yang diperbaiki lewat pencucian ialah :

- a. Menghasilkan produk yang lebih uniform
- b. Distribusi ukuran yang optimum
- c. Kandungan *moisture* optimum
- d. Mengurangi kandungan mineral

Tulisan ini akan membahas karakteristik dan parameter kualitas/ analisis batubara yang berkaitan dengan penggunaannya.

2.1.1. Air (*Moisture*)

Air yang ada pada atau di dalam batubara akan ikut terangkut atau tersimpan bersama batubara bila banyaknya ada dalam jumlah besar, air tersebut akan meningkatkan ongkos atau mendatangkan kesulitan pada penanganannya. Misalnya adanya air permukaan akan menyebabkan batubara lengket dan akan menyulitkan pada *hopper* atau *chute* atau pada waktu menggerusnya. Adanya *moisture* akan menurunkan nilai panas dan sebagian panas juga hilang pada penguapan air.

Air yang pada batubara terdapat pada:

- Permukaan dan di dalam rekahan-rekahan, disebut air bebas (*free moisture*) atau air permukaan (*surface moisture*).
- Rongga-rongga kapiler, disebut *inherent moisture*.
- Pada kristal-kristal partikel-partikel mineral yang ada pada batubara disebut air hidrasi.
- Bagian organik dari batubara disebut air dekomposisi.

Air permukaan mempunyai tekanan uap normal, sama seperti air biasa, sedangkan *inherent moisture* yang berada di dalam pori-pori, tekanan uapnya lebih rendah dari normal. Air hidrasi umumnya terdapat pada material lempung dan merupakan bagian dari *lattice* (kisi-kisi) kristalnya. Air ini baru terbebaskan pada temperatur 500° C. Air dekomposisi terbebaskan pada temperatur 200° – 250° C. Air hidrasi dan air dekomposisi tidak termasuk pada analisis air batubara biasa, karena untuk analisis tersebut menggunakan temperatur jauh di bawah 200°C.

Air total adalah jumlah air permukaan dan *inherent moisture* dari batubara pada waktu analisis. Nama lain dari air total ialah *as-received moisture*. *Air dried* adalah air yang ada

setelah pengeringan dengan udara terbuka. Ada beberapa perbedaan pendapat tentang pengertian air di dalam batubara.

2.2.2. Kandungan Abu

Abu adalah sisa yang tersisa setelah proses pembakaran batubara sesuai dengan kondisi yang telah ditetapkan (ASTM D-3174; ISO 1171) dan mayoritas terdiri dari oksida dan sulfat. Penting untuk membedakannya dari *mineral matter*, yang terdiri dari mineral-mineral anorganik tak berubah yang ada dalam batubara (Given dan Yarzab, 1978; Elliott, 1981, serta referensi yang dirujuk di dalamnya; Speight, 1994, serta referensi yang dirujuk di dalamnya). Oleh karena itu, abu terbentuk sebagai hasil perubahan kimia yang berlangsung pada *mineral matter* selama proses perubahan menjadi abu. Kuantitas abu bisa lebih banyak, sama banyaknya, atau kurang dari *mineral matter* dalam batubara, tergantung pada karakteristik *mineral matter* dan perubahan kimia yang muncul saat proses pembakaran. Berbagai perubahan ini melibatkan kehilangan air dari mineral silikat, pelepasan karbon dioksida dari mineral karbonat, oksidasi pirit besi menjadi oksida besi, serta penyatuan oksida sulfur dengan basa seperti kalsium dan magnesium. Nyatanya, kondisi pembakaran memengaruhi sejauh mana perubahan berat terjadi, dan sangat penting untuk mengikuti prosedur standar dengan cermat agar hasil dapat direproduksi.

Mineral dalam batubara terbagi menjadi dua jenis, yakni *mineral matter* eksternal dan *mineral matter* inheren. *Mineral matter* eksternal mencakup komponen seperti kalsium, magnesium, serta karbonat besi, pirit, marcasite, tanah liat, serpih, pasir, dan gypsum. *Mineral matter* inheren menggambarkan unsur-unsur anorganik yang bergabung dengan komponen organik batubara yang berasal dari sisa-sisa bahan tumbuhan tempat batubara terbentuk.

Penggunaan batubara dengan *mineral matter* yang menghasilkan abu kaya oksida seringkali berujung pada masalah pelelehan dan penumpukan. Sebagai oksida, sebagian besar unsur abu memiliki titik lebur tinggi, tetapi mereka cenderung membentuk senyawa kompleks (sering disebut campuran eutektik) yang memiliki titik lebur relatif rendah. Namun, batubara dengan abu kaya kalsium dan rendah besi cenderung menunjukkan kecenderungan menghasilkan *slag* dengan rentang pelelehan rendah, terutama jika kandungan natrium dalam *slag* melebihi sekitar 4% w/w.

Komposisi kimia abu batubara memiliki peranan penting dalam masalah penumpukan dan pelelehan serta dalam viskositas abu batubara dalam tungku basah bawah dan siklon. Selain itu, batubara dengan kandungan besi tinggi (biasanya >20% w/w *ferric oxide*) umumnya menunjukkan suhu pelelehan abu di bawah 1205°C (2200°F).

Dalam beberapa metode pengujian, direkomendasikan untuk mencatat warna abu, karena ini memberikan indikasi perkiraan titik pelelehan. Secara umum, abu dengan warna kuat cenderung memiliki titik pelelehan rendah, sementara abu yang berwarna putih, asalkan tidak mengandung oksida basa secara signifikan, memiliki titik pelelehan yang tinggi.

Adapun hubungan kandungan abu dengan kelas batubara dijelaskan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Kandungan Abu dalam Batubara

Komponen	Kelas Batubara		
	Lignite	Bituminous	Sub - bituminous
SiO ₂	15-45%	20-60%	40-60%
Al ₂ O ₃	10-25%	5-35%	20-30%
Fe ₂ O ₃	4-15%	10-40%	4-10%
CaO	15-40%	1-12%	5-30%
MgO	3-10%	0.1-5%	1-6%
SO ₃	0.1-10%	0.1-4%	0.1-2%
Na ₂ O	0.1-6%	0.1-4%	0.1-2%
K ₂ O	0.1-4%	0.1-3%	0.1-4%

Sumber: ASTM C618 – 92a, 1994

2.2.3. Zat Terbang

Apabila batubara dipanaskan di dalam atmosfer yang inert sampai mencapai temperatur 950 C, akan menghasilkan material yang disebut zat terbang. Zat terbang tersebut terdiri dari campuran gas senyawa organik bertitik didih rendah yang akan mencair menghasilkan material berbentuk oil dan tar. Proses menghasilkan zat terbang ini disebut pirolisis yang berarti memisahkan dengan menggunakan panas.

Kebanyakan material yang ada di dalam zat terbang adalah hasil pelepasan ikatan kimia di dalam batubara selama proses pemanasan, terdiri dari gas-gas mudah terbakar seperti hidrogen, karbon monoksida, metan, uap tar dan gas yang tidak terbakar seperti karbon dioksida dan uap air. Uap air disini adalah uap air yang tidak termasuk air total tetapi termasuk air hidrasi dan air dekomposisi. Komposisi dari zat terbang berbeda-beda menurut rank.

Zat terbang ini sangat penting karena dipakai sebagai parameter dalam klasifikasi dan evaluasi batubara untuk pembakaran, karbonisasi (pembuatan kokas), gasifikasi dan liquefaksi.

Zat terbang, sebagaimana ditentukan oleh metode pengujian standar (misalnya, ASTM D-3175; ISO 562), adalah persentase produk terbang, eksklusif uap kelembaban, yang dilepaskan selama pemanasan batubara atau kokas di bawah kondisi yang ketat terkendali. Penurunan berat contoh yang diukur yang dikoreksi untuk kelembaban menentukan jumlah material (zat terbang) yang berevolusi dari batubara di bawah kondisi pengujian. Namun, metode ini, karena sifat empirisnya, memerlukan ketaatan yang ketat terhadap spesifikasi terperinci, dan karena pengujian ini pada dasarnya merupakan pengujian sampel batubara dalam skala kecil daripada pengujian kimia murni, maka penting untuk mengikuti kondisi yang telah ditentukan dengan ketat agar hasilnya dapat dibandingkan antar laboratorium.

Nilai zat terbang penting dalam memilih kesesuaian terbaik antara jenis peralatan pembakaran batubara tertentu dan batubara yang digunakan dengan peralatan tersebut. Nilai-nilai tersebut berharga bagi insinyur bahan bakar dalam menentukan dan menjaga tingkat pembakaran yang tepat. Nilai zat terbang digunakan sebagai indikasi jumlah asap

yang mungkin dikeluarkan dari tungku atau jenis peralatan pembakaran batubara lainnya. Batasan dapat diterapkan pada kadar zat terbang dalam batubara yang digunakan dalam fasilitas pembakaran batubara tertentu untuk mengendalikan emisi asap.

Fuel ratio berbagai jenis batubara adalah (Tabel 2.2) :

Tabel 2.2. *Fuel Ratio* Berbagai Jenis Batubara

Jenis Batubara	Fuel Ratio
1. Coke	92
2. Antrasit	24
3. Semi antrasit	8,6
4. Bitumen	
- <i>Low volattile</i>	2,8
- <i>Medium volatile</i>	1,9
- <i>High volatile</i>	1,3
5. Lignitt	0,9

Sumber: Sukandarrumidi, 1995

Selain itu, jumlah zat terbang yang dilepaskan oleh batubara selama pemanasan lambat (dimulai dari suhu kamar) berbeda dengan jumlah yang dilepaskan oleh pemanasan cepat (yaitu, aplikasi instan suhu akhir). Ketika batubara dipanaskan secara perlahan, hasil zat terbang berkurang dan karbon terikat meningkat. Selain itu, ada hubungan antara hasil zat terbang yang dilepaskan oleh batubara selama pirolisis cepat dan suhu yang dikenai batubara serta rasio hidrogen/karbon atom dalam batubara. Di atas rentang 200 hingga 1000°C (390 hingga 1830°F), hubungan tersebut linear, dan batubara yang diolah sebagian, di mana hanya sebagian dari zat terbang yang terlepas, saat dipanaskan pada suhu lebih tinggi menghasilkan jumlah zat terbang tambahan yang dihitung.

Zat terbang adalah komponen yang aktif dalam menghasilkan energi panas saat batubara terbakar. Oleh karena itu, terdiri dari gas-gas yang mudah terbakar seperti hidrogen, karbon monoksida dan metan. Kandungan zat terbang sangat terkait dengan tingkat kualitas batubara, di mana semakin tinggi kandungan zat terbang, semakin rendah kelas batubara tersebut. Dalam pembakaran batubara yang memiliki kandungan zat terbang tinggi, proses pembakaran karbon tetap (*Fixed Carbon/FC*) dan intensitas nyala api akan dipercepat. Sebaliknya, bila kandungan zat terbang rendah, proses pembakaran akan menjadi lebih sulit. Kesempurnaan pembakaran ini, *fuel ratio*, dapat dirumuskan dengan perbandingan *fix carbon* dengan kandungan zat terbang.

Seiring dengan peningkatan nilai rasio bahan bakar, jumlah karbon yang tidak terbakar dalam batubara juga meningkat. Jika nilai perbandingan ini melebihi 1,2 maka kualitas pembakaran akan menurun. Akibatnya, kecepatan proses pembakaran akan mengalami penurunan. Perbandingan antara kandungan karbon terikat (*fixed carbon*) dan kandungan zat terbang (*fuel ratio*) dari berbagai jenis batubara dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Zat Terbang merupakan jumlah dari sejumlah senyawa yang cenderung mudah menguap. Senyawa-senyawa volatile ini memiliki peran kunci dalam memicu proses pembakaran batubara. Semakin sedikit senyawa volatile yang terdapat dalam batubara, semakin sulit batubara tersebut untuk terbakar, meskipun batubara memiliki kandungan *fixed carbon* yang tinggi.

2.2.4. Fixed Carbon

Fixed carbon adalah materi yang tersisa setelah dilakukan pengukuran kadar air, zat terbang, dan abu dalam batubara. Ini sebenarnya merupakan ukuran dari material padat yang dapat terbakar dalam batubara setelah pengusiran zat terbang, dan seperti penentuan residu karbon pada minyak bumi dan produk minyak bumi (Speight, 2001).

Nilai *fixed carbon* merupakan salah satu nilai yang digunakan dalam menentukan efisiensi peralatan pembakaran batubara. Ini adalah ukuran dari material padat yang dapat terbakar yang tersisa setelah zat terbang dalam batubara dihilangkan. Oleh karena itu, nilai ini juga digunakan sebagai indikasi hasil kokas dalam proses pembentukan kokas. Total *fixed carbon* ditambah dengan abu pada dasarnya mewakili hasil kokas. Nilai *fixed carbon*, yang dikoreksi menjadi basis yang bebas dari bahan mineral dan kering, digunakan sebagai parameter dalam sistem klasifikasi batubara (ASTM D-388).

Pelaporan data (yaitu pernyataan hasil dari metode pengujian analisis proksimat) biasanya mencakup (di beberapa negara tetapi tidak semua negara) deskripsi warna abu dan tumbol kokas. Sebagai perbandingan yang menarik, pengujian untuk menentukan residu karbon, kecenderungan pembentukan kokas dari fraksi minyak bumi dan produk minyak bumi (ASTM D-189; ASTM D-2416), menganjurkan penggunaan lebih dari satu cawan. Cawan porselen digunakan untuk mengandung sampel, dan ini ditempatkan di dalam dua cawan besi luar. Ini mencerminkan dekomposisi termal sampel dalam pasokan terbatas udara (oksigen) dan pengukuran residu karbon yang tersisa pada akhir pengujian.

2.2.5. Total Sulfur

Sulfur merupakan salah satu komponen yang terdapat dalam batubara, hadir dalam bentuk sulfur organik dan anorganik. Umumnya, komponen sulfur dalam batubara ada sebagai sulfur *syngenetic* yang memiliki hubungan erat dengan proses fisika dan kimia selama proses pengendapan (Meyers, 1982), dan juga bisa berupa sulfur epigenetic yang dapat terlihat sebagai pirit yang mengisi celah pada batubara akibat proses presipitasi kimia pada tahap akhir pembentukan batubara (Mackowsky, 1968).

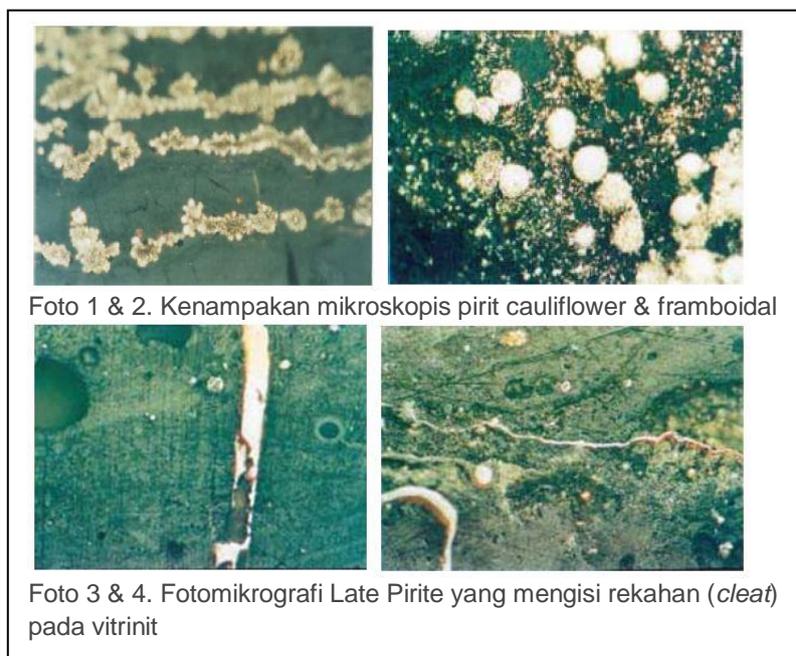
Adapun sulfur yang terdapat dalam batubara dapat dibagi menjadi tiga jenis utama, yakni sulfur pirit, sulfur organik dan sulfur sulfat.

a. Sulfur Pirit

Pirit (FeS_2) mempunyai densitas 5,01 gr/cc atau sekitar 3,5 kali lebih padat dari batubara. Jadi 1 % volume pirit pada lapisan batubara dapat diartikan 3,5 % berat FeS_2 atau sekitar 1,9 % berat sulfur. Contoh gambar pirit dalam batubara dapat dilihat pada Gambar 2.1

Pirit dan markasit adalah mineral sulfida yang umumnya ditemukan dalam batubara. Kedua mineral ini memiliki komposisi kimia yang sama, yaitu FeS_2 , namun memiliki struktur kristal yang berbeda. Pirit memiliki struktur isometrik, sementara markasit memiliki struktur ortorombik (Taylor G.H, dkk., 1998). Pirit (FeS_2) adalah mineral yang berkontribusi besar terhadap kandungan sulfur dalam batubara, yang sering disebut sebagai sulfur pirit (Mackowsky, 1943 dalam Organic Petrology, 1998). Berdasarkan asalnya, asalnya, pirit dalam batubara dapat dibagi menjadi dua jenis, yakni pirit *syngenetic* dan *epigenetic*. Pirit *syngenetic* yaitu pirit yang terbentuk selama proses pembentukan batubara dari material organik (*peatification*). Pirit jenis ini umumnya

memiliki struktur berbentuk framboidal dengan butiran yang sangat halus dan tersebar di dalam komponen pembentuk batubara (Demchuk, 1992). Pirit *epigenetic* adalah pirit yang terbentuk setelah proses pembatubaraan. Pirit jenis ini umumnya terendap di dalam patahan, retakan, dan celah batubara, sering kali dalam bentuk yang massif (Mackowsky, 1968; Gluskoter, 1977; Frankie dan Howe, 1987).



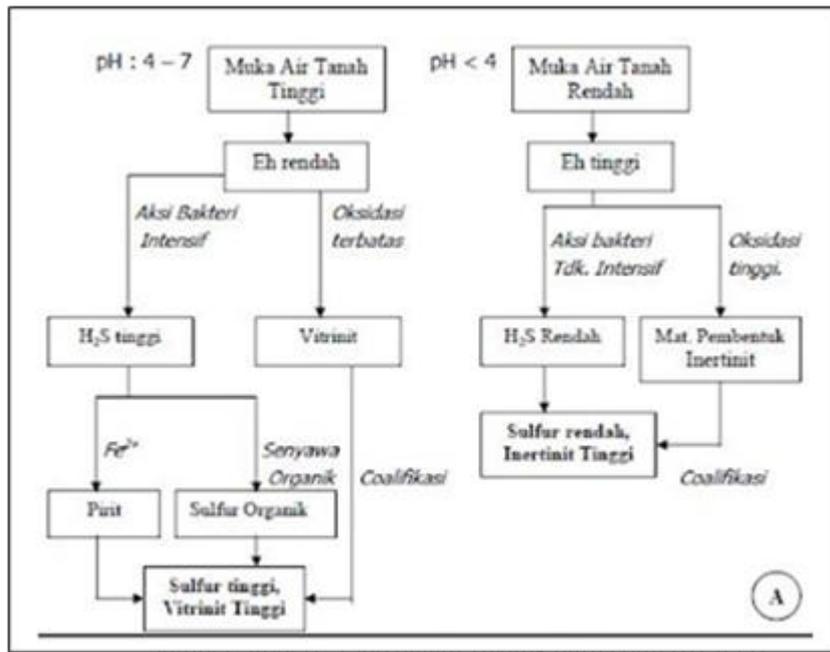
Sumber: <http://www.tukangbatu.com/2015/11/tipe-tipe-sulfur-pada-batubara>

Gambar 2.1. Foto sayatan tipis batubara yang menunjukkan adanya pirit

Pembentukan pirit pada batubara terjadi akibat reaksi antara H_2S dan Fe dalam larutan. Proses ini melibatkan bakteri yang mereduksi SO_4 menjadi H_2S pada pH 4.5 – 7 yang diikuti oleh penggabungan H_2S , sulfur elemental dan FeO membentuk pirit dan air (Gambar 1). Hanya dengan cara ini pirit dapat terbentuk pada gambut dan batubara low-rank. Dengan demikian, kehadiran bakteri dan pH rawa merupakan faktor yang sangat menentukan pembentukan pirit. SO_4 bisa berasal dari air laut atau vegetasi, sedangkan Fe kemungkinan berasal dari dekomposisi mineral lempung atau terdapat dalam larutan sebagai koloid organik yang stabil (Gambar 2.2).

b. Sulfur Organik

Sulfur Organik adalah unsur yang terdapat dalam struktur makromolekul dalam batubara, di mana keberadaannya sebagian dipengaruhi oleh kandungan unsur dari material tumbuhan asal. Dalam kondisi geokimia dan mikrobiologis tertentu, sulfur anorganik dapat berubah menjadi sulfur organik. Sulfur organik dapat terakumulasi dari berbagai bahan organik melalui proses dekomposisi biokimia dan oksidasi. Namun secara umum, dekomposisi biokimia merupakan faktor utama dalam pembentukan sulfur organik, dan proses ini cenderung berlangsung lebih lambat di lingkungan yang lembap atau berair (A.C. Cook, 1982).



Gambar 2.2. Model pembentukan pirit pada batubara

Sulfur yang tidak berasal dari material pembentuk batubara diyakini berperan dominan dalam menentukan kandungan sulfur total. Sulfur anorganik yang umumnya melimpah di lingkungan air laut atau payau kemungkinan akan mengalami perubahan menjadi hidrogen sulfida dan senyawa sulfat dalam kondisi geokimia tertentu. Reaksi ini melibatkan reduksi sulfat oleh material organik menjadi hidrogen sulfida (H₂S). Reaksi reduksi ini diinduksi oleh bakteri seperti *desulfovibrio* dan *desulfotomaculum* (Meyers, 1982).

c. Sulfur Sulfat

Sulfur Sulfat biasanya memiliki kandungan yang sangat rendah atau bahkan tidak ada, kecuali jika batubara telah teroksidasi dan beberapa mineral pirit mengalami oksidasi menjadi sulfat (Meyers, 1982). Secara umum, kandungan sulfur organik cenderung lebih tinggi di bagian bawah lapisan batubara, sementara kandungan sulfur pirit dan sulfat akan lebih tinggi di bagian atas dan bawah lapisan batubara.

Data total sulfur (ASTM D-3177; ASTM D-4239) diperlukan untuk mengontrol emisi oksida sulfur ketika batubara digunakan sebagai bahan bakar. Emisi sulfur dioksida menyebabkan korosi pada peralatan dan timbulnya slagging pada peralatan pembakaran atau ketel, serta berkontribusi pada polusi atmosfer dan kerusakan lingkungan. Oleh karena itu, data sulfur diperlukan untuk mengevaluasi batubara yang akan digunakan untuk tujuan pembakaran.

Sebagian besar proses konversi dan pembersihan batubara memerlukan dua set nilai sulfur: kandungan sulfur batubara sebelum digunakan dan kandungan sulfur produk yang terbentuk. Pada proses kokasasi batubara, sebagian sulfur dihapus dalam proses kokasasi, sehingga diperlukan untuk memperoleh nilai sebelum dan sesudah proses tersebut. Penggunaan komersial kokas, seperti dalam proses metalurgi, memerlukan kandungan sulfur rendah dan memerlukan nilai sulfur yang akurat untuk kokas tersebut. Pada proses

gasifikasi dan peleburan batubara, sulfur dalam batubara kadang-kadang dapat terbawa hingga ke produk-produknya. Oleh karena itu, perlu menentukan jumlah sulfur dalam masing-masing produk sebelum digunakan. Salah satu alasan utama untuk membersihkan batubara adalah untuk mengurangi kandungan sulfur. Diperlukan untuk mengetahui kandungan sulfur sebelum dan setelah proses pembersihan untuk mengevaluasi proses pembersihan tersebut.

Nilai total sulfur saja tidak cukup dalam mengevaluasi proses pembersihan untuk mengurangi kandungan sulfur batubara. Sulfur pirit saja dapat dihapus dengan pemisahan berat jenis tertentu, dan penghapusan ini bergantung pada cara sebaran pirit di seluruh batubara. Jika pirit terdapat sebagai kristal yang sangat kecil yang tersebar luas di dalam batubara, hampir tidak mungkin untuk menghapusnya dengan metode ini. Ketika pirit terdapat dalam potongan besar, dapat dihapus dengan metode berat jenis tertentu. Sulfur organik tidak dapat dikurangi secara signifikan, karena biasanya tersebar merata di seluruh materi organik dalam batubara.

Penggunaan utama data mengenai bentuk-bentuk sulfur berkaitan dengan pembersihan batubara. Dalam batas tertentu, sulfur pirit dapat dihilangkan dari batubara melalui metode pemisahan berat jenis, sedangkan sulfur organik tidak dapat dihilangkan. Oleh karena itu, kandungan sulfur pirit dapat digunakan untuk memprediksi seberapa banyak sulfur yang dapat dihilangkan dari batubara dan untuk mengevaluasi proses pembersihan. Jika sulfur pirit terdapat dalam lapisan, biasanya dapat dihilangkan dengan efisien. Namun, jika terdapat dalam bentuk kristal halus yang tersebar di seluruh batubara, penghilangannya menjadi sangat sulit.

Penggunaan lain dari data mengenai bentuk-bentuk sulfur adalah inklusi nilai sulfur pirit dalam rumus untuk estimasi oksigen berdasarkan perbedaan dan sebagai sarana yang mungkin untuk memprediksi sejauh mana pelapukan batubara. Konsentrasi sulfat meningkat saat batubara mengalami pelapukan, sehingga nilai sulfur sulfat dapat digunakan sebagai indikasi sejauh mana pelapukan batubara.

2.2.6. Nilai Kalor

Nilai kalor mengacu pada jumlah panas yang dihasilkan saat batubara terbakar dalam sebuah kalorimeter bom dengan oksigen di bawah kondisi yang telah ditentukan (ASTM D-121; ASTM D-2015; ASTM D-3286; ISO 1928). Dalam analisis batubara, nilai kalor diukur menggunakan kalorimeter bom, baik dengan metode statis (isotermal) maupun metode adiabatik, dengan dilakukan koreksi jika nilai kalor bersih (net) menjadi perhatian. Satuan yang digunakan adalah kalori per gram, dan satuan ini dapat diubah menjadi unit lainnya ($1,0 \text{ kcal/kg} = 1,8 \text{ Btu/lb} = 4,187 \text{ kJ/kg}$). Nilai kalor menggambarkan langsung kandungan panas (nilai energi) dari batubara dan mencakup total panas pembakaran karbon, hidrogen, nitrogen, serta sulfur dalam materi organik, serta sulfur dalam pirit. Nilai kalor yang diperoleh adalah nilai kalor bruto.

Nilai kalor biasanya diungkapkan sebagai nilai kalor bruto (*Gross Calorific Value; GCV*) atau nilai kalor pemanasan lebih tinggi (*High Heatin Value; HHV*) serta nilai kalor neto (*Nett Calorific Value; NCV*) atau nilai kalor pemanasan lebih rendah (*Low Heating Value; LHV*). Perbedaan antara nilai kalor bruto dan nilai kalor neto adalah panas laten kondensasi uap air yang dihasilkan selama proses pembakaran. Nilai kalor bruto mengasumsikan bahwa seluruh uap yang dihasilkan selama proses pembakaran

sepenuhnya terkondensasi. Nilai kalor neto mengasumsikan bahwa air dihilangkan bersama produk pembakaran tanpa sepenuhnya terkondensasi. Untuk menyamakan semua efek, nilai kalor batubara sebaiknya dibandingkan berdasarkan dasar nilai kalor neto. Nilai kalor batubara bervariasi secara signifikan tergantung pada kandungan abu, kelembaban, dan jenis batubara, sementara nilai kalor minyak bahan bakar jauh lebih konsisten.

Nilai kalor batubara merupakan properti yang penting. Sebagai contoh, nilai kalor bruto dapat digunakan untuk menghitung total kandungan kalor dari jumlah batubara atau kokas yang direpresentasikan oleh sampel untuk tujuan pembayaran. Nilai kalor bruto juga dapat digunakan untuk menghitung nilai kalor berdasarkan kandungan sulfur guna menentukan apakah batubara memenuhi persyaratan regulasi untuk bahan bakar industri. Nilai kalor bruto dapat digunakan untuk mengevaluasi efektivitas proses benefisi. Nilai kalor bruto dapat diperlukan untuk mengklasifikasikan batubara (ASTM D-388).

Nilai kalor biasanya merupakan parameter utama dalam PLTU. Hal ini menjadi aspek yang paling signifikan yang ditentukan untuk batubara yang akan dimanfaatkan sebagai sumber energi pemanasan. Adanya ketidakpastian dalam nilai kelembaban tercermin dalam nilai kalor yang dinyatakan dalam basis yang sesuai. Nilai kalor yang diukur di laboratorium dikenal sebagai nilai kalor bruto. Namun, pembakaran batubara sebagai bahan bakar tidak menghasilkan jumlah panas yang sebanding per unit massa. Oleh karena itu, dilakukan koreksi terhadap nilai kalor bruto untuk memperhitungkan perbedaan antara kondisi di laboratorium dan kondisi di fasilitas pembakaran batubara. Nilai yang telah dikoreksi ini disebut sebagai nilai kalor neto. Definisi dari nilai kalor neto adalah panas yang dihasilkan oleh pembakaran unit massa batubara pada tekanan atmosfer yang konstan, dengan mempertimbangkan bahwa semua air dalam produk hasil pembakaran tetap berbentuk uap. Nilai kalor neto cenderung lebih rendah daripada nilai kalor bruto.

2.2.7. Mineral Matter

Mineral matter mengacu pada unsur-unsur anorganik dalam batubara dan mencakup semua unsur yang bukan bagian dari bahan organik batubara (karbon, hidrogen, nitrogen, oksigen, dan sulfur). Mineral matter adalah sumber utama unsur-unsur yang membentuk abu saat batubara dibakar dalam udara atau oksigen. Empat dari lima unsur yang umumnya dianggap sebagai unsur organik (karbon, hidrogen, oksigen, dan sulfur) juga hadir dalam kombinasi anorganik dalam batubara. Karbon hadir dalam bentuk karbonat mineral (biasanya kalsium, magnesium, dan besi); hidrogen hadir dalam bentuk air bebas dan air hidrasi; oksigen hadir dalam bentuk oksida, air, sulfat, dan silikat; dan sulfur hadir dalam bentuk sulfida dan sulfat (Gambar 2.3)

Mineral matter dalam batubara umumnya diklasifikasikan sebagai (1) *inherent mineral matter*, dan (2) *adventitious mineral matter*. *Inherent mineral matter* adalah bahan anorganik yang terlalu erat terkait dengan bahan batubara untuk dapat dipisahkan dengan mudah menggunakan metode yang tersedia saat ini. *Adventitious mineral matter* adalah bahan anorganik yang lebih kurang terkait dengan batubara dan dapat dipisahkan dengan mudah. Ada juga saran bahwa mineral-mineral yang diangkut dan terendapkan di rawa gambut oleh angin dan air disebut sebagai allogenik atau detrital, dan mineral-mineral lainnya yang terbentuk di tempat (authogenik) dibagi menjadi yang terbentuk

secara bersamaan dengan pembentukan batubara (*syngenetic*) dan yang pembentukannya mengikuti tahap awal pematbatubaraan (*epigenetic*).



Sumber: <https://www.uky.edu/KGS/coal/coal-mineral-matter.php>.

Gambar 2.3. Penampakan *mineral matter* pada batubara

Mineral matter umumnya merupakan bagian yang signifikan dari komposisi batubara, dan jumlah *mineral matter* dalam batubara bervariasi dari lapisan ke lapisan, bahkan dalam satu lapisan yang sama. Batubara dengan kandungan *mineral matter* hingga 32% berat telah diidentifikasi, meskipun nilai rata-rata yang wajar untuk jumlah *mineral matter* jauh lebih rendah, disarankan untuk berhati-hati saat menggunakan angka rata-rata. Nilai rata-rata biasanya tidak memiliki hubungan dengan kenyataan, di mana rentangnya dapat bervariasi dari jauh di bawah rata-rata hingga jauh di atas rata-rata. Kinerja batubara berdasarkan rata-rata mungkin dapat diterima, tetapi penggunaan batubara dengan kandungan *mineral matter* tinggi dapat menyebabkan masalah yang signifikan dalam pembangkit listrik. Secara umum, *mineral matter* dalam batubara (apa pun kandungannya) dianggap tidak diinginkan dan merugikan dalam penggunaan batubara, dan keberadaan *mineral matter* mempengaruhi hampir setiap aspek penambangan, persiapan, transportasi, dan penggunaan.

Persiapan batubara bertujuan untuk mengurangi kuantitas *mineral matter*, dan penggunaan efisien dari metode yang dipilih tergantung pada konsentrasi dan komposisinya. Namun, tidak peduli seberapa efektif teknik persiapan batubara, selalu ada jumlah *mineral matter* yang signifikan yang tersisa. Material sisa ini memiliki kepentingan besar dalam penggunaan batubara.

Ketika batubara dibakar dalam unit pembakaran, *mineral matter* mengalami perubahan besar yang menyebabkan masalah pembentukan *clinker*, *fly ash*, *slagging*, dan korosi pipa ketel. Efisiensi unit pembakaran terkait dengan jumlah abu yang dihasilkan, karena itu adalah pengencer. Di sisi positif, abu telah dimanfaatkan sebagai bahan konstruksi dan merupakan sumber potensial bahan tahan api, seperti tambahan semen, atau sebagai adsorben untuk proses pembersihan gas. Namun, komposisi abu harus diketahui sebelum dapat dimanfaatkan dengan cara ini.

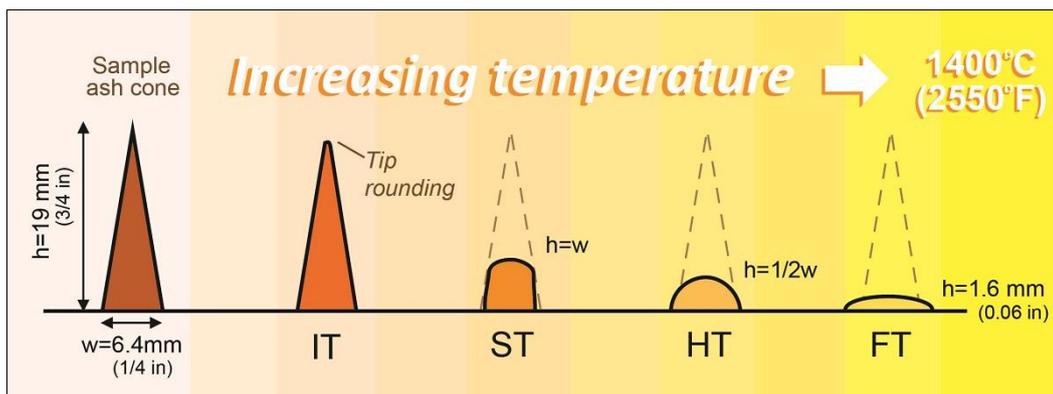
Salah satu hambatan utama dalam mempelajari *mineral matter* dalam batubara adalah kesulitan dalam mendapatkan sampel statistik yang valid (representatif) dari fase mineral yang bebas dari bahan organik. Pada pandangan pertama, tampaknya mudah untuk memisahkan mineral dari batubara dengan teknik berat jenis spesifik. Batubara, bagian organiknya, memiliki berat jenis spesifik yang rendah (pada kisaran 1,2 hingga 1,4), sedangkan mineral yang ada dalam batubara memiliki berat jenis spesifik antara 2 hingga 5 atau lebih. Namun, sifat terdispersi halus dari mineral-mineral dalam batubara menghambat pemisahan yang lengkap. Pemisahan yang tidak lengkap berdasarkan berat jenis spesifik, yang menjadi dasar banyak proses pembersihan atau pencucian batubara, efektif dalam membagi sampel menjadi beberapa bagian yang relatif kaya mineral dan

beberapa yang mengandung batubara murni. Berat jenis spesifik dapat digunakan untuk menentukan mode keberadaan unsur kimia dan mineral dalam batubara, dan ini membuat prosedur tersebut penting, tetapi kemungkinan besar prosedur ini tidak akan memberikan sampel mineral yang representatif yang dapat diterima.

2.2.8. Ash Fusion Temperature (AFT)

Titik leleh abu (*Ash Fusion Temperature, AFT*) merujuk pada suhu pada saat abu batubara mulai meleleh. Pada kondisi dimana nilai *AFT* lebih rendah daripada suhu yang ditetapkan untuk keluaran gas dari tungku (*Furnace Exit Gas Temperature, FEGT*), abu batubara berpotensi mengalami meleleh dan membentuk lapisan *slagging* yang dapat menyebabkan penurunan efisiensi *boiler*. Penurunan efisiensi ini berakibat pada kerugian yang signifikan dalam industri. Oleh karena itu, penting untuk memiliki nilai *AFT* batubara yang lebih tinggi dari suhu *FEGT* yang telah ditetapkan.

Pengukuran suhu leleh abu dilakukan dengan memanaskan abu batubara yang telah diambil sampelnya dan membentuknya menjadi bentuk kerucut di dalam suatu tungku (Gambar 2.4).



Sumber: <http://www.uky.edu/KGS/coal/coal-analyses-ash-fusion.php>

Gambar 2.4. Perubahan kerucut abu batubara pada saat dipanaskan

Penentuan *AFT* sangat penting dalam mengevaluasi potensi pembentukan *slagging* pada *boiler*. Selama pemanasan, suhu dimana perubahan bentuk terjadi diukur. Terdapat empat kategori utama dalam mengklasifikasikan temperatur leleh abu:

- Temperatur deformasi awal (*Initial Temperatur; IT*), suhu dimana perubahan bentuk pertama kali terlihat pada ujung kerucut.
- Temperatur pelunakan (*Softening Temperatur; ST*), pada titik ini, kerucut mulai meleleh dan membentuk bentuk bulat dengan ketinggian yang sama dengan lebarnya.
- Temperatur *hemispherical (HT)*, suhu dimana kerucut meleleh menjadi bentuk setengah bola dengan ketinggian menjadi setengah dari lebar dasarnya.
- Temperatur Fluida (*Fluid Temperatur; FT*), pada suhu ini, seluruh abu telah meleleh dan membentuk lapisan fluida dengan ketinggian maksimal sekitar 1/16 inci.

2.2.9. *Handgrove Grindability Index (HGI)*

Handgrove Grindability Index (HGI) adalah salah satu sifat fisik dari batubara yang mengindikasikan sejauh mana batubara dapat diubah menjadi serbuk halus dengan ukuran partikel 200 mesh atau 75 mikron. *HGI* memiliki relevansi yang signifikan bagi pengguna batubara di pembangkit listrik yang menggunakan teknologi *pulverized coal*. Meskipun *HGI* tidak secara langsung menggambarkan performa *pulverizer* atau *milling*, ia dapat digunakan sebagai perbandingan kemudahan penggerusan antara berbagai jenis batubara. Namun, performa penggilingan masih dipengaruhi oleh kondisi operasional mill, seperti tention mill, suhu udara primer, pengaturan *classifier*, dan faktor lainnya.

Prosedur pengujian *HGI* dilakukan dengan menggunakan mesin *Wallace Hardgrove* (Gambar 2.5). Sampel batubara yang telah digerus pada ukuran partikel tertentu dimasukkan ke dalam mesin tersebut. Selanjutnya, penggilingan dilakukan dengan menggunakan bola baja pada putaran yang telah ditentukan. Performa *pulverizer* atau *mill* dirancang berdasarkan nilai *HGI* tertentu. Dalam situasi di mana *HGI* lebih rendah, mesin harus dioperasikan dengan parameter lebih rendah dari nilai standarnya untuk mencapai tingkat kehalusan yang setara.



Sumber: <https://www.rseprojects.co.za/products/hardgrove-grindability-index-machine-hgi/>

Gambar 2.5. *Hardgrove Grindability Index Machine*

Beberapa sifat dan karakteristik *HGI* meliputi :

- Nilai *HGI* suatu batubara ditentukan oleh komposisi organiknya, seperti jenis maceral dan faktor lainnya.
- Secara umum, semakin tinggi peringkat batubara, semakin rendah nilai *HGI*-nya. Namun, pengecualian terjadi pada bituminus dengan sifat *cooking*, di mana nilai *HGI* dapat sangat tinggi, bahkan melebihi 100.
- Nilai *HGI* juga dipengaruhi oleh adanya abu dilusi dari penambangan. Umumnya, penambahan abu dilusi dapat meningkatkan nilai *HGI*.
- Kandungan kelembaban batubara juga dapat mempengaruhi nilai *HGI*.

Pengukuran *HGI* mengacu pada Standar ISO 5074:1994 dan ASTM D409-08. ISO merupakan Standar Internasional yang diproduksi oleh BSI Group, yang bertindak sebagai Badan Standar Nasional (NSB) untuk Inggris. Sementara itu, ASTM adalah *American Standard for Testing and Materials*, yang menyediakan metode pengujian, spesifikasi, panduan, dan praktik-praktik untuk mendukung industri dan meningkatkan kualitas pengujian produk.

HGI memiliki beberapa karakteristik penting. *HGI* adalah tes empiris yang tidak terkait langsung dengan properti fisik batubara. Meskipun telah ditingkatkan seiring waktu, reproduktifitasnya masih relatif rendah dan pengulangan pengujian dapat menghasilkan ketidakjelasan dalam mengevaluasi kinerja dan karakteristik batubara. Perbaikan dalam tes empiris sulit karena tidak ada tujuan untuk menjadikannya sebagai properti fisik yang terdefinisi. Karakteristik kedua *HGI* adalah menunjukkan perubahan non-linear dalam kesulitan penggerusan. Batubara dengan nilai *HGI* rendah lebih sulit untuk digerus, sementara nilai tinggi jauh lebih mudah. Sebagai contoh, perubahan dari *HGI* 30 ke 40 memiliki dampak yang lebih besar dibandingkan dengan perubahan dari *HGI* 60 ke 70. Namun, perubahan ini tidak selalu bersifat kontinu dan bergradasi. Peningkatan dalam kehalusan produk terjadi seiring peningkatan *HGI*, dan sebaliknya, kapasitas pabrik menurun ketika menggiling batubara dengan *HGI* lebih rendah.

Spesifikasi batubara terdiri dari daftar properti yang dianggap penting untuk kinerja efisien dalam aplikasi, baik itu pembakaran atau gasifikasi. Properti ini bisa dijelaskan dalam bentuk rentang nilai atau nilai terbatas. *HGI* dapat ditentukan dengan baik. Tidak ada dasar logis untuk menentukan batas rendah *HGI* kecuali faktor-faktor properti lain dari batubara. Namun, masalah timbul terkait presisi pengukuran *HGI*. Pengulangan pengujian pada sampel yang sama di laboratorium seharusnya tidak berbeda lebih dari dua poin. Reprodusibilitas nilai rata-rata duplikat dalam penentuan *HGI* di laboratorium seharusnya tidak berbeda lebih dari tiga poin atau dua poin. Ketidakpresisian dalam pengujian ini dapat menyebabkan perbedaan pendapat antara pembeli dan penjual batubara.

Dalam pemanfaatan batubara, penting untuk memahami sifat-sifat yang ditunjukkan oleh batubara tersebut, baik secara kimiawi, fisik, maupun mekanis. Sifat-sifat ini dapat ditarik atau disimpulkan dari data hasil analisis dan pengujian kualitas batubara. Beberapa data kualitas dapat dijadikan rata-rata, seperti kandungan air dan abu yang bersifat kimiawi. Namun, ada juga data yang perlu diperhatikan dalam rentang harga minimum dan maksimum, seperti nilai *Hardgrove Index* dan titik leleh abu.

2.2.10. Coking dan Caking

Caking adalah sifat yang menggambarkan kemampuan batubara untuk membentuk gumpalan yang mengembang selama pemanasan. Tes ini dilakukan pada tingkat pemanasan yang cepat. Salah satu metode pengukuran sifat *caking* ini adalah menggunakan angka pengembangan *crucible* (disebut juga sebagai indeks pengembangan bebas (ASTM) dan indeks tombol kokas) serta kekuatan pembentukan gumpalan yang diukur dengan uji roga. Perilaku *caking* memiliki implikasi signifikan dalam produksi kokas. Kokas yang berkualitas harus tahan lama dan tidak mudah hancur.

Crucible Swelling Number (CSN) merupakan salah satu metode pengujian yang digunakan untuk mengamati sifat *caking* pada batubara. Metode ini cukup sederhana dan mudah

dilakukan. *Caking* adalah kemampuan batubara membentuk gumpalan yang mengembang selama pemanasan. Indeks roga (*roga index*) adalah hasil dari salah satu metode pengujian *caking* yang dikenal sebagai uji roga. Pengujian ini bertujuan untuk mengukur kekuatan pembentukan gumpalan. Indeks ini juga digunakan dalam klasifikasi internasional batubara sebagai alternatif dari angka pengembangan *crucible*.

Coking adalah sifat yang terkait dengan perilaku batubara selama proses karbonisasi (proses pembuatan *coke* secara komersial) serta sifat *coke* yang dihasilkan. Pengujian ini dilakukan pada tingkat pemanasan yang lambat yang lebih mendekati kondisi pemanasan pada oven *coke*. Metode pengukuran sifat *coking* ini antara lain adalah jenis *coke Gray-King*, dilatometri (Audibert-Arnu), dan plastometri (Gieseler). Selain untuk memperkirakan potensi batubara dalam pembuatan *coke*, kedua sifat ini juga memiliki kepentingan dalam pengklasifikasian batubara.

Coke dihasilkan dari karbonisasi batubara kokas primer. Karbonisasi dilakukan karena tiga alasan utama: untuk menghasilkan bahan bakar tanpa asap untuk keperluan rumah tangga/industri, untuk menyediakan kokas untuk berbagai proses lain (terutama pada tanur sembur), dan untuk memproduksi gas yang mudah terbakar. Proses ini juga menghasilkan produk lain, termasuk bahan kimia yang dahulu sangat penting.

Coking coal adalah jenis batubara yang digunakan dalam proses pembuatan *coke* atau kokas yang digunakan dalam industri pembuatan baja dan besi. Istilah lain yang sering digunakan adalah *metallurgical coal*. Untuk memahami *coking coal*, pemahaman tentang *coke* perlu dipegang terlebih dahulu, karena *coking coal* adalah batubara yang memiliki sifat-sifat yang sesuai untuk diolah menjadi *coke*. *Coke* sendiri adalah bahan keras dengan porositas dan konsentrasi karbon tinggi yang dihasilkan dari proses pemanasan batubara bituminous tanpa udara pada suhu sangat tinggi (pirolisis). *Coke* dihasilkan dengan memanaskan batubara dalam oven *coke* dalam keadaan reduksi. Penggunaan *coking coal* umumnya berhubungan dengan industri baja atau besi yang terintegrasi. Proses pembuatan baja membutuhkan bijih besi dan kokas sebagai bahan baku.

2.2.11. Porositas

Batubara mengandung dua sistem pori, yaitu pori dengan ukuran rata-rata 500 Å dan yang lain dengan pori berukuran 5 – 15 Å (1 Å = 10⁻¹⁰ m). Pori yang kecil lebih sedikit dibandingkan dengan yang besar, tetapi luas permukaannya besar (kira-kira 200 m²/gr).

Pori-pori yang lebih besar mempunyai total luas permukaan pori 1 m²/gr. Pori-pori ini dapat menyerap metan yang terbentuk pada tahap akhir dari pembentukan batubara. *Low volatile bituminous coal* mempunyai kemampuan menyerap metan lebih besar dan laju difusi rendah, pada batubara yang tidak rusak.

Hal ini berkaitan dengan sering terjadinya ledakan dan kebakaran pada tambang-tambang *low volatile bituminous coal*, bila terbentuk rekahan-rekahan yang memungkinkan keluarnya gas metan. Permukaan dalam dari pori ini merupakan akses terhadap reaktan yang akan memberikan laju reaksi yang berarti seperti pada proses gasifikasi, pembakaran dan lain-lain.

2.2.12. Berat Jenis (*Density*)

Ada beberapa macam pengukuran berat jenis, tergantung pada tujuan penggunaannya, diantaranya adalah :

- *Bulk density* adalah berat per satuan volume batubara lepas. Pengetahuan *bulk density* ini diperlukan misalnya untuk menghitung besarnya *stock pile*, *bin* dan lain-lain untuk menyimpan batubara dengan berat tertentu.
- *Apperent density* adalah berat jenis bongkah batubara termasuk *inherent moisture*, *mineral matter* dan udara di dalam pori.
- *True density* adalah berat jenis batubara yang bebas dari udara dan air yang terikat, tetapi termasuk *mineral matter*.

Faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya berat batubara antara lain sebagai berikut:

- *Rank*, umumnya batubara dengan *rank* yang tinggi cenderung mempunyai berat jenis yang tinggi pula. Meningkatnya berat jenis ini mungkin disebabkan oleh perubahan-perubahan yang terjadi selama proses pembentukan yaitu terbentuknya grup-grup hidrokarbon yang lebih berat.
- Komposisi petrografik, *exinit* adalah grup maseral paling ringan, sedangkan *fusinit* yang paling padat (berat jenis lebih besar). Berat jenis *exinit* dan *micrinit* dari batubara *sub bituminous* dan *bituminous* masing-masing berkisar antara 1-1,28 dan 1,35 – 1,45, sedangkan *fusinit* lebih dari 1,5.
- *Impurities*, air dan mineral adalah dua *grup impurities* yang ada di dalam batubara, dan baru datang dari tambang, masih jenuh dengan air. Berat jenis batubara berkurang dengan mengeringnya batubara.
- Batubara yang mengandung abu lebih besar juga mempunyai berat jenis lebih besar. Umumnya berat jenis batubara bervariasi mulai dari 1,23 hingga 1,72.

2.2.13. Grindability dan Friability

Grindability adalah ukuran mudah sukarnya batubara digerus menjadi berbutir halus untuk penggunaan bahan bakar bubuk (*pulverized coal*) dibandingkan dengan batubara standar yang dipilih sebagai *grindability 100*. Dengan demikian batubara akan lebih sukar digerus bila *index grindability*-nya lebih kecil dari 100 dan akan lebih sukar digerus bila *index grindability*-nya lebih besar dari 100. *Grindability* ini disebut *Hardgrove index*, nama yang berasal dari nama penemu cara uji *grindability* tersebut yaitu *Ralp Hardgrove*.

Batubara yang mudah digerus adalah batubara yang termasuk medium dan *low volatile group*, sedangkan batubara dari *high volatile bituminous* dan antrasit lebih sukar. *Grindability* juga berkaitan dengan kandungan karbon, yaitu *grindability* membesar dengan meningkatnya kandungan karbon sampai 90 % dan kemudian mengecil.

Friability adalah ukuran kemampuan untuk menahan remuknya material selama penanganannya. Baik *grindability* maupun *friability* tergantung karakteristik *toughnes*, *elastisitas* dan *fracture*.

Aspek penting dari *friability* ialah meningkatnya luas permukaan yang baru selama *handling* batubara yang *friable*. Hal ini memungkinkan mempercepat reaksi oksidasi dan

karenannya kondisi ini memungkinkan mempercepat reaksi oksidasi dan karenanya kondisi ini memungkinkan terjadinya *ignition* secara spontan, hilangnya kualitas coking pada *coking coal*, serta perubahan-perubahan lain yang mengikuti oksidasi.

Friability membesar menurut *rank* hingga kandungan *fixed carbon* 75 % dan setelah itu menurun (antrasit).

2.2.14. Weathering

Weathering adalah kecenderungan batubara untuk pecah bila ia mengering. Umumnya hampir semua batubara bila kontak dengan atmosfer, cepat atau lambat akan menunjukkan gejala *weathering*. Kenyataan lain banyak batubara yang tersimpan mampu terbakar secara spontan. Biasanya ini akan timbul bila jumlah panas yang terbebaskan oleh proses oksidasi lebih besar dari jumlah panas yang tersedia secara konveksi atau konduksi.

Untuk berat tertentu batubara, makin besar permukaan terekspose akan makin besar laju oksidasi. Oleh karena dengan makin kecilnya ukuran batubara, makin besar luas permukaan per satuan berat, maka akan mudah terbakar secara spontan. *Low rank coal* menunjukkan kecenderungan berarti untuk remuk bila terekspose dengan atmosfer, terutama bila batubara tersebut secara bergantian terkena basah dan kering atau terkena sinar panas matahari.

Batubara yang segera remuk bila terekspose, mengandung *moisture* yang tinggi. Bila batubara tersebut terekspose ia akan kehilangan *moisture* tersebut pada bagian permukaan lebih dahulu dan diikuti keluarnya *moisture* dari bagian dalam. Apabila kehilangan *moisture* dari permukaan berlangsung cepat dan tidak segera diikuti oleh *moisture* dari bagian dalam maka laju pengkerutan di bagian luar lebih cepat dari bagian dalam. Akibatnya timbul stress di bagian permukaan.

Stress ini menyebabkan batubara rekah-rekah dan remuk berkeping-keping. Sama halnya batubara kering dibasahi hujan, bagian permukaan batubara mendapat air lebih cepat dari bagian dalam batubara, menyebabkan pemuaiian di permukaan lebih besar dan batubara akan remuk.

Weathering, seperti halnya handling batubara rapuh menyebabkan terbentuknya material halus yang banyak, akan dapat berakibat turunnya nilai batubara. Demikian juga menyimpan batubara yang mudah *weathering* tidak menyenangkan karena tidak saja menurunkan ukuran batubara besar, *slacking* juga dapat berakibat batubara terbakar dengan sendirinya karena meningkatnya permukaan yang terekspose pada oksidasi.

2.2.15. Komposisi Ukuran

Hal yang penting dalam menentukan harga batubara tertentu di pasar adalah kualitasnya yang diukur dengan karakteristik penggunaannya seperti kandungan abu dan sulfur, nilai panas. Kualitas ini sungguhpun sangat penting, umumnya dikaitkan dengan *size consist*, dimasukkan di dalam banyak kontrak, yang sering dinayatakan dengan % maksimum *undersize* yang diizinkan dan kadang-kadang juga dalam % *oversize* yang diizinkan.

Sejumlah faktor menentukan komposisi ukuran dari *run of mine coal*. Dari segi batubaranya : kekuatan dan sifat sistem remuknya, lainnya : cara penambangan serta usaha yang dilakukan untuk mencegah pengecilan batubara. Semua ini sangat bervariasi.

Brysch dan Ball membuktikan bahwa komposisi ukuran mengendalikan *bulk density* dari batubara kering, dengan penyebaran yang luas dari ukuran memberikan *bulk density* tertinggi. Makin halus partikel, density mengecil (masih ditentukan ukuran terbesar). Untuk batubara basah makin kecil ukuran partikel, makin rendah *minimum bulk density*.

2.2.16. Kekuatan

Kekuatan batubara berkepentingan langsung dengan penambangan dan peremukan kekuatan dan *mode of failure* tergantung pada rank dan kondisi batubara dan cara-cara menerapkan stress. Kekuatan batubara banyak dipelajari dengan cara uji kompresi, sebab hasilnya dapat diterapkan dalam memperkirakan kapasitas beban pilar di dalam tambang.

2.2.17. Abrasiveness

Abrasiveness dari batubara penting dalam pengertian ekonomi pada pertambangan, preparasi dan penggunaan. Batubara adalah material abrasif. Oleh karena itu keausan pada pemboran, cutting (alat tambang) dan alat angkut sangat tinggi dan sering harus diganti. Demikian juga pada waktu crushing dan grinding untuk menghasilkan *pulverized coal*, keausan alat tinggi yang berakibat mahal biaya ongkos.

Penelitian menunjukkan, *abrasiveness* batubara tidak sama. Beberapa keausannya tinggi yang lain rendah. Hal ini disebabkan karena batubara merupakan material heterogen yang mempunyai komponen berbeda-beda sifatnya.

Suatu cara menentukan *abrasiveness* dari batubara dikembangkan oleh *Seattle Coal research Laboratory of USBM*. Secara garis besar caranya sebagai berikut : Alat terdiri dari 4 blade besi yang berputar di dalam tempat berisi batubara, diputar dalam jumlah putaran yang tetap dan ditentukan kehilangan berat dari blade selamates.

Penelitian menunjukkan beban *abrasiveness* lebih ditentukan oleh macam dan banyaknya impurities di dalam batubara. Dengan demikian, pencucian yang bertujuan mengurangi impurities juga akan mengurangi *abrasiveness*.

2.2.18. Impurities Batubara

Ada dua jenis *Impurities* (pengotor) yang terbentuk di dalam batubara, yaitu impurities yang akan membentuk abu bila dibakar, atau dikenal sebagai *mineral matter*, dan impurities yang mengandung sulfur. *Impurities* lain seperti fosfor dan garam tertentu sering juga ada.

Bila ditinjau dari segi pencucian batubara, impurities dapat diklasifikasikan lagi menjadi *inherent impurities* dan *extraneous impurities*.

Inherent impurities menyatu dengan batubara dan tidak dapat dipisahkan, sedangkan *extraneous impurities* tersegregasi dan dapat dipisahkan dengan cara-cara pencucian pada umumnya.

Semua batubara mengandung mineral matter. Residu dari mineral ini setelah batubara dibakar disebut abu. Kandungan abu rata-rata 2–3% dilapisan batubara dan 10% atau lebih pada tambang-tambang komersial. Batubara yang mengandung abu sangat tinggi pada penggunaan biasa disebut *bone coal*, *carbonaceous shale* atau *black slate*. Mineral yang terkandung di dalam batubara sangat bervariasi baik jumlah maupun distribusinya. Keberadaannya sangat menentukan dalam segala segi mulai dari penambangan sampai penggunaannya.

Mineral pembentuk abu yang menyatu dengan batubara disebut *inherent mineral matter*. Bagian ini berasal dari unsur-unsur kimia yang telah ada pada tumbuh-tumbuhan asal batubara. Umumnya *inherent mineral matter* kira-kira 2 % dari total abu. *Extraneous mineral matter* adalah material pembentuk abu yang berasal di luar dari tumbuh-tumbuhan asal batubara.

Bagian terbesar dari abu ini berasal dari *detrital matter* yang mengendap ke dalam endapan batubara, endapan berkrystal yang masuk bersama air ke dalam rekahan-rekahan dan *cleavage*, pada masa selama atau sesudah pembentukan batubara. Umumnya ia terdiri dari *slate*, *shale*, *sandstone* atau *limestone* yang berukuran mulai dari ukuran mikroskopik sampai membentuk lapisan yang agak tebal.

Batubara yang ditambang juga membentuk unsur mineral matter ini dengan *shale*, *sandstone*, *clay* dan material lain berasal dari atap atau lantai endapan yang ikut tergali. Kandungan inherent mineral matter merupakan batas terkecil dari abu yang ada pada batubara dengan asumsi semua extraneous impurities dapat dipisahkan selama pencucian.

Ada beberapa rumus empiris yang dapat digunakan untuk menentukan mineral matter dari data-data analisis abu dan unsur-unsur lain.

- Formula Parr Asli (North America)

$$MM = 1.08 A + 0.55 S_{tot}$$

- Formula Parr Modifikasi (North America):

$$MM = 1.13 A + 0.47 S_{pyr} + Cl$$

- Formula King – Maris – Crossley (KMC) yang direvisi oleh *National Coal Board (Britain)* :

$$MM = 1.13 A + 0.5 S_{pyr} + 0.8 CO_2 - 2.8 S_{abu} + 2.8 S_{sal} + 0.31 Cl$$

- *Formula British Coal Utilization Research Association (BCURA)*

$$MM = 1.10 A + 0.53 S_{tot} + 0.74 CO_2 - 0.36$$

- *Formula Standard Association of Australia (Australia):*

$$MM = 1.1 A$$

- *Formula National Institute for Coal Research (South Africa)*

$$MM = 1.1 A + 0.55 CO_2$$

Formula-formula di atas didasarkan pada basis *air dried*, dengan :

MM = mineral matter

A = abu

S_{tot} = sulfur total

S_{pyr} = sulfur pirit

S_{abu} = sulfur yang tertinggal di abu

S_{sul} = sulfur sulfat

CO₂ = karbon dioksida

Cl = klor

Seperti telah dinyatakan sebelumnya, di dalam batubara juga ada komponen abu (*ash*) yaitu residu yang berasal dari *mineral matter* hasil dari perubahan batubara. Komposisi kimianya berbeda dan beratnya lebih kecil dari *mineral matter* yang ada di dalam batubara asalnya. Selama perubahan, terjadi perubahan berat karena kehilangan air dari silikat asal, kehilangan CO₂ dari karbonat, oksida pirit menjadi oksida.

Komponen unsur-unsur abu yang utama : Na, K, Mg, Ca, Al, Si, Fe dan S. Kedelapan unsur ini dan juga *Titan* dan *Fosfor* (umumnya terdapat dengan jumlah sangat kecil), dilaporkan ketika abu dianalisis di laboratorium. Hasil analisis ini dilaporkan sebagai oksida. Misalnya Natrium dilaporkan sebagai persen *natrium oksida* dan besi sebagai ferrioksida. Perjanjian ini selalu diikuti walaupun misalnya tidak ada satupun unsur-unsur tersebut yang terdapat dalam bentuk oksida di dalam abu.

Di samping itu perlu diteliti beberapa unsur-unsur minor atau *trace* yang ada di dalam batubara mengingat faktor-faktor berikut ini :

- 1) Adanya beberapa unsur-unsur minor dapat menjadi kunci yang membantu ahli geokimia mempelajari lebih lanjut tentang pengendapan batubara dengan diikuti sejarah geologi dari batubara. Misalnya *Boron* telah digunakan sebagai indikator tingkat salinitas dari lingkungan selama proses pembentukan batubara.
- 2) *Arsenic*, *selenium* dan *mercury*, sering ada dalam jumlah *trace* di batubara dan dapat berbahaya pada lingkungan jika ia dibebaskan pada waktu pembakaran batubara.
- 3) Batubara mungkin dapat digunakan sebagai sumber unsur logam jarang (*rare element*). Misalnya sekarang ini abu dianggap sebagai sumber potensial dari *galium* dan *germanium*, dua unsur yang merupakan bahan semi konduktor

2.3. Karakteristik Abu Batubara

2.3.1. Sifat Lebur Abu

Pemahaman tingkah laku batubara pada temperatur tinggi sangat penting dalam penentuan kecocokan batubara pada penggunaannya diberbagai tungku. Prosedur standar untuk menentukan tingkah laku abu pada temperatur tinggi ialah *ash fusion test*. Pada uji ini contoh berupa abu batubara dibuat berbentuk piramid sisi tiga dan memanaskannya dari 900^oC sampai 1600^oC di dalam atmosfer reduksi. Empat (4) temperatur yang dicatat pada saat terjadi perubahan bentuk piramid asal yaitu perubahan bentuk asal, *spherical*, *hemispher* dan cair.

Temperatur perubahan ini merupakan pegangan terbaik untuk mengetahui unjuk kerja abu di dalam lingkungan tungku dimana ia dibakar. Ada 3 titik penting yang semuanya ditentukan di dalam *atmosfer reducing* :

- Temperatur deformasi awal, yaitu temperatur dimana contoh terlihat mulai membundar atau menekuk pada *apexpyramid*.
- Temperatur pelunakan yaitu temperatur dimana contoh telah melebur membentuk tumpukan bulat.
- Temperatur lebur, temperatur dimana leburan contoh mulai menyebar membentuk lapis tipis.

Ash Fusion Temperatur (ATF) diukur dalam dua kondisi yaitu kondisi oksidasi dan kondisi reduksi. Pengukuran di bawah kondisi oksidasi biasanya menunjukkan harga yang lebih besar, tergantung pada keberadaan beberapa komponen abu seperti besi oksida. Besi oksida ini mempunyai *efek fluxing* (sifat sebagai *flux* atau bahan imbu) yang berbeda bilamana dalam bentuk teroksidasi dan tereduksi.

Ash Fusion Temperature, dalam kondisi *oxidising* atau *reducing* tergantung pada jenis operasi pemanfaatan batubaranya. Sebagai contoh pada pabrik untuk memproduksi gas, kondisi *reducing* terjadi pada *fuel bed* sehingga AFT diukur pada kondisi *reducing*. Dilain pihak kondisi pada dasar *fixed bed furnace* adalah *oxidicing* sehingga AFT diukur pada kondisi *oxidising*. Pada kasus pembakaran *pulverised fuel*, kondisinya tidak selalu pasti, dalam nyala api kondisinya *reducing*, sementara diluar nyala api kondisinya *oxidising* tergantung pada jumlah udara yang diberikan.

Ash Fusion Temperature dipengaruhi oleh kondisi abu sebagai berikut :

- Al_2O_3 2 SiO_3 (misalnya perbandingan Al_2O_3 / SiO_2 adalah 1 : 1.18) mempunyai *flow temperature* yang tinggi dan rentang temperatur leleh (*fusion temperature*) yang sempit (kerdil).
- CaO , MgO , dan Fe_2O_3 bertindak sebagai *flux* dan akan menurunkan AFT, khususnya bilamana terdapat SiO_2 yangberlebih.
- FeO , Na_2O dan K_2O mempunyai kapasitas yang tinggi untuk menurunkanAFT.
- Kadar sulfur yang tinggi menurunkan *initial deformation temperature* dan melebarkan rentang temperatur leleh.

Salah satu penggunaan dari data *ash fusion temperature* ini ialah untuk membedakan antara *slagging coal* dan *non slagging coal*. Jika temperatur pelunakan dibawah $1250^{\circ}C$, batubara disebut *slagging coal*. Ia akan baik digunakan didalam tungku yang dapat mengeluarkan abu sebagai *slag*.

Batubara yang temperatur pelunakan abunya di atas $1.450^{\circ}C$ disebut *non-slagging*. Abu pada batubara ini umumnya tidak akan lebur pada kebanyakan tungku industri. Batubara yang temperatur pelunakannya terletak antar $1.250^{\circ}C$ — $1.450^{\circ}C$, mungkin dapat atau mungkin tidak dapat membentuk *slag*. Batubara tipe ini tungku harus dirancang agar tercegah pembentukan leburan abu atau dirancang agar abu lebur dan tetap lebur sampai dikeluarkan.

Penggunaan *slagging coal*, memerlukan pengetahuan tentang sifat-sifat dari *slag*. Harus ada kepastian bahwa *slag* tetap cair dan mengalir sampai dikeluarkan dari tungku tanpa masalah. Sifat yang perlu dikenal sekali yang berkaitan dengan *slag* cair adalah viskositasnya. Viskositas menentukan mudah sukarnya *slag* cair bergerak.

2.3.2. Viskositas Slag

Sungguhpun temperatur lebur abu digunakan untuk memperkirakan karakteristik aliran (*fluiditas*) abu, ia tidak dapat memperkirakan seberapa cair abu itu ketika menjadi slag. Dua abu batubara yang mempunyai temperatur lebur abu sama, dapat mempunyai karakteristik aliran abu yang sangat berbeda. Fluiditas dari *slag* dapat dinyatakan dengan viskositasnya dengan poise pada temperatur tertentu. Viskositas akan mengecil (mudah mengalir) dengan naiknya temperatur. Pada temperatur tungku yang tetap, viskositas *slag* berbeda-beda menurut komposisi kimia dari abu.

Viskositas abu yang membentuk terak pada berbagai temperatur merupakan parameter penting dalam mengevaluasi sistem pembersihan abu yang cocok. Terak biasanya mempunyai viskositas 250 poise atau lebih rendah sehingga mempunyai karakteristik aliran yang baik. Temperatur terak pada viskositas 250 poise disingkat sebagai T250. T250 ini merupakan parameter desain yang sangat penting.

Hubungan viskositas, temperatur *slag* dan harga T250 ditentukan oleh komposisi abu dan kondisi sekelilingnya apakah *oxidising* atau *reducing*. Pengukuran viskositas terak secara praktis sulit dilakukan dan umumnya harga T250 diperkirakan dari hubungan parameter yang dihitung dari hasil analisis abu, yaitu : *silica ratio* umumnya berkisar antara 0.4 sampai 0.8, harga yang lebih rendah memberikan harga T250 yang lebih rendah. Harga umumnya sekitar 0.1 sampai 1.0. Harga *base-to-acid ratio* yang lebih tinggi memberikan harga T250 yang lebih rendah. Hubungan ini biasanya digunakan untuk abu yang bersifat asam dimana harga *base-to-acid ratio* lebih rendah dari 0.6.

Harga berkisar antara 0.5 sampai 0.9. Harga *dolomite ratio* yang lebih rendah memberikan harga T250 yang lebih rendah. Hubungan ini biasanya sering digunakan untuk abu batubara lignit yang bersifat biasa dimana harga *base-to-acid ratio* lebih besar dari 0.6. Harga berkisar antara 0.1 sampai 0.8. Harga *ferritic ratio* yang semakin rendah memberikan harga T250 yang semakin rendah pula.

$$a. \text{ Silica Ratio} = \frac{\text{SiO}_2}{\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}}$$

Harga silica ratio umumnya berkisar antara 0.4 sampai 0.8, harga yang lebih rendah memberikan harga T250 yang lebih rendah.

$$b. \text{ Base-to-Acid Ratio} = \frac{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2}$$

Harga umumnya sekitar 0.1 sampai 1.0. Harga *base-to-acid ratio* yang lebih tinggi memberikan harga T250 yang lebih rendah. Hubungan ini biasanya digunakan untuk abu yang bersifat asam dimana harga *base-to-acid ratio* lebih rendah dari 0.6.

$$c. \text{ Dolomite Ratio} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{NaO} + \text{K}_2\text{O}}$$

Harga berkisar antara 0.5 sampai 0.9. Harga *dolomite ratio* yang lebih rendah memberikan harga T250 yang lebih rendah. Hubungan ini biasanya sering digunakan untuk abu batubara lignit yang bersifat biasa dimana harga *base-to-acid ratio* lebih besar dari 0.6.

$$d. \text{ Ferritic Ratio} = \frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3 + 1.11 \text{FeO} + 1.43 \text{Fe}}$$

2.3.3. Deposisi Abu Dalam Tanur dan Boiler

1) Pembentukan Klinker

Dalam suatu tanur pembakaran (*fuel bed furnace*) dapat terbentuk klinker massif (campuran). Partikel-partikel abu dan batubara yang halus) pada kisi-kisi sehingga dapat menyebabkan terhalangnya aliran udara. Dalam kasus-kasus tertentu pabrik harus dihentikan dan klinker harus dikeluarkan secara manual. Abu dengan nilai *ash fusion temperature* rendah (nilai ISO-A lebih rendah dari 1.100°C) cenderung membentuk klinker massif, sementara itu abu dengan nilai *ash fusion temperature* tinggi (nilai ISO-A lebih tinggi dari 1.300°C) dianggap aman pada kondisi operasi normal.

2) Fused Slag Deposits (Slagging)

Slagging berkaitan dengan masalah transportasi partikel abu yang meleleh atau lengket oleh gas pembakaran dan masalah benturan partikel abu tersebut pada permukaan tanur dan permukaan-permukaan lain. Deposits abu yang terbentuk terak ini bisa terus bertambah dan untuk mengendalikannya biasanya secara berkala digunakan *soot blowers* yaitu suatu alat untuk menghilangkan terak yang menempel pada permukaan dengan menggunakan uap atau udara sebagai media penghembus (*blowing medium*). Kecenderungan abu untuk membentuk terak diperkirakan dari nilai *slagging index* yang didefinisikan sebagai berikut:

$$\text{Slagging Index} = \text{Base-to-Acid Ratio} \times \text{Kadar Sulfur Batubara}$$

Jika kadar sulfur di atas 2%, harga *slagging index* bervariasi antara 0,1 sampai 0,2. Nilai *slagging index* yang semakin besar menunjukkan kecenderungan abu untuk membentuk deposit terak (*fused slag deposits*). Pada kondisi operasi normal, abu dengan nilai *slagging index* di bawah 0,5 tidak akan menimbulkan masalah dengan pembentukan terak, tetapi bila nilai *slagging index* lebih besar dari 1,5 fasilitas *soot-blowing* yang memadai harus tersedia untuk meminimalisir pembentukan deposit terak.

3) Deposit yang Terikat pada Temperatur Tinggi (*High Temperature Bonded Deposits / Fouling*)

Umumnya *bonded deposits* terbentuk akibat kadar alkali yang tinggi. Garam-garam sodium dan potassium, akan terbang (*tervolatilisasi*) selama pembakaran, kemudian terkondensasi pada partikel-partikel abu terbang dan *boiler* membentuk lapisan yang lengket (*sticky layer*). Benturan partikel-partikel tersebut dapat membentuk deposit teragglomerasi pada dinding dan selanjutnya membentuk *sinter*. Akhirnya menjadi keras

dan menempel dengan sangat kuat. Oksida sulfur terabsorpsi oleh lapisan yang kaya dengan kandungan alkali sehingga menyebabkan korosi pada dinding *boiler*.

Pada dasarnya, semakin rendah kadar alkali dari batubara, semakin rendah pula kecenderungan untuk membentuk *foul*. Kandungan alkali batubara biasanya dinyatakan sebagai Na₂O ekuivalen. Batubara dengan kandungan alkali lebih rendah dari 0,1% dianggap sebagai *non fouling*, batubara dengan kandungan alkali antara 0,1%-0,4% biasanya menimbulkan tumbuhnya deposit (*fouling*), tetapi masih bisa dikendalikan dengan *soot-blowing* secara berkala, batubara dengan kandungan alkali diatas 0,5% cenderung membentuk deposit (*fouling*) dan menghasilkan *sinter* sehingga sulit di hilangkan. Harga *fouling index* dapat dihitung dari rumus berikut:

$$\text{Fouling Index} = \text{Base-to-acid ratio} \times \text{kadar alkali total (Na}_2\text{O) batubara}$$

Harga *fouling index* ini memberikan gambaran kecenderungan batubara untuk membentuk deposit yang lengket (*foul*). Harga *fouling index* sampai 0,5 masih dalam toleransi yang dibolehkan.

4) Deposit yang Terbentuk pada Temperatur Rendah (*Low Temperature Deposits*)

Serangan asam pada temperatur *sub-dewpoint* dalam *economiser* dan pemanas udara dapat membentuk deposit basah dan lengket sehingga partikel-partikel abu terbang yang terbentur pada deposit ini bisa tertarik. Keadaan asam deposit tersebut dapat menyebabkan reaksi dengan beberapa komponen abu seperti besi, sodium, dan kalsium sehingga menambah ikatan deposit dan meningkatkan jumlah ruahnya. Deposit ini sebgaiian larut dalam air sehingga dapat dikendalikan dengan penyemprotan air secara periodik, walaupun sebagian lagi larut seperti ikatan kalsium sulfat.

2.4. Kandungan Sulfur

Sulfur umumnya terdapat dalam kebanyakan batubara, jumlahnya dapat bervariasi mulai dari jumlah yang sangat kecil (*traces*) sampai 4%, kadang lebih tinggi. Sulfur terdapat dalam tiga bentuk utama yaitu *sulfur piritik* (FeS₂), jumlahnya sekitar 20-30% dari sulfur total dan terasosiasi dalam abu, terjadi baik sebagai makrodeposit (*lensa, veins, joints, balls*, dan sebagainya) dan mikrodeposit (partikel-partikel halus yang terdiseminasi).

- *Sulfur Organik*, jumlahnya sekitar 20-80% dari sulfur total dan secara kimia terikat dalam substansi batubara, biasanya berasosiasi dengan konsentrasi sulfat (dan sulfida) selama proses pembatubaraan.
- *Sulfur Sulfat*, kebanyakan sebagai kalsium sulfat dan besi sulfat, jumlahnya sangat kecil kecuali pada batubara yang terekspos dan teroksidasi.

Makro deposit dari sulfur piritik dapat dihilangkan dengan proses pencucian, sementara itu mikrodeposit dari sulfur piritik serta sulfur organik dan sulfat sulit dihilangkan.

2.4.1. Pengaruh Sulfur dalam Pembakaran

Jika batubara dibakar, semua sulfur organik dan sebagian sulfur piritik akan teroksidasi menjadi SO₃ karena adanya beberapa komponen abu yang bertindak sebagai katalis. Sulfur piritik dan sulfur sulfat yang tertinggal berubah menjadi sulfida inorganik yang lebih stabil dan tertinggal dalam batubara. Sebagai tambahan, abu terbang yang dihasilkan dari

pembakaran batubara *pulverised* mempunyai kemampuan untuk mengabsorpsi SO_3 dari aliran gas pembakaran.

Kecenderungan sulfur tertinggal dalam abu juga tergantung pada metoda pembakaran. Untuk tanur *pulverised fuel*, 10-15% sulfur tertinggal dalam abu, untuk tanur siklon hanya 5% (kemungkinan disebabkan oleh karena temperatur yang lebih tinggi), dan untuk *stoker* bisa sampai 30%- sulfur tertinggal dalam batubara.

Pengaruh adanya senyawa sulfur dalam abu dan gas-gas pembakaran terhadap operasi tanur dan *boiler* adalah sebagai berikut:

-Sulfur sebagai besi sulfida, dalam abu dapat memperbesar perbedaan antara *ash fusion temperature* yang diukur pada kondisi mengoksidasi dan mereduksi dan menurunkan *initial deformation temperature (ISO-A)*. Pengaruh ini disebabkan aksi *fluxing* (bertindak sebagai *flux*) dari besi.

-Absorpsi sulfur oksida, dalam bentuk SO_3 oleh lapisan deposit abu (*fouling*) yang bersifat basa dan kaya alkali akan memberikan kontribusi semakin kuatnya lapisan *fouling* serta terus tumbuh. Selanjutnya bisa menimbulkan korosi setempat pada dinding *boiler*.

- SO_3 bersama uap air dalam gas-gas pembakaran dapat membentuk asam sulfat (H_2SO_4). Uap asam sulfat ini dapat terkondensasi pada temperatur rendah sehingga bersifat korosif.

-Efisiensi penangkapan abu terbang oleh *electrostatic precipitators* sebagian tergantung pada konduktivitas listrik tersebut dapat lebih tinggi dengan adanya senyawa ionik seperti SO_3 . Dalam kasus konduktivitas gas dan partikel rendah, kadang-kadang diinjeksikan senyawa ionik termasuk SO_2 atau SO_3 ke dalam gas buang untuk menjaga efisiensi penangkapan partikulat oleh *electrostatic precipitator*.

2.4.2. Pengendalian Emisi Sulfur

Pengendalian emisi sulfut dapat dilakukan dengan sistem-sistem berikut ini :

- Penambahan *limestone* (kapur)

Limestone diinjeksikan ke dalam tanur selanjutnya terkalsinasi oleh gas- gas pembakaran yang panas untuk membentuk kalsium sulfat yang selanjutnya dikeluarkan dari aliran gas dengan sistem penangkap partikulat konvensional. Efisiensi penghilangan SO_2 ini umumnya rendah berkisar 25-45%.

-*Wet Scrubbing*

Slurry dari *limestone* atau larutan magnesium oksida digunakan sebagai sistem penangkap gas untuk menghilangkan SO_2 sebesar 80-95%, bisa sampai 99%.

-*Dry Sorbent Systems*

Material-material pengabsorb seperti karbon aktif, char atau alumina yang dicampur dengan tembaga, mengabsorpsi SO_2 dengan efisiensi sebesar 90% atau lebih.

2.4.3. Pengaruh Sulfur dalam Pembuatan Semen

Kadar sulfat dalam batubara sebagai bahan bakar merupakan masalah kritis dalam pabrik semen. Sulfur memasuki *kiln* semen melalui material umpan dan bahan bakar serta keluar sebagai kalsium sulfat dalam prosuk klinker dan sebagian dalam jumlah lebih kecil keluar melalui gas buang. Standart industri membatasi jumlah kalsium sulfat dalam klinker tetapi secara normal kandungan-kandungan kalsium sulfat tersebut memang cukup tinggi. Batubara dengan kadar sulfur sampai 3% atau 4% masih bisa digunakan tanpa menimbulkan masalah yang berarti.

2.5. Sifat-sifat Plastis Batubara

Apabila batubara jenis bituminos dipanaskan ia akan mengalami suatu seri perubahan fasa :

- a. Partikel batubara melunak (pada temperatur 400°C) dan mencair.
- b. Akan terjadi pemuaihan segera setelah partikel menyatu dan melebur.
- c. Pemuaihan berhenti pada temperatur sekitar 500°C ketika batubara kehilangan plastisitasnya dan mulai membeku membentuk struktur porous yang disebut kokas.

Perilaku batubara antara temperatur pelunakan dan temperatur pembekuan kembali (*resolidification*) umumnya disebut sifat plastis dari batubara. Plastisitas akan teramati ketika telah terjadi proses dekomposisi, mula-mula terjadi proses depolimerisasi batubara, diikuti dengan munculnya produk cair yang akan merubah komponen lain menjadi plastis dan gas yang membentuk gelembung-gelembung. Ketika gelembung-gelembung lewat melalui pori-pori besar dan rekahan dari partikel batubara, akan melawan tahanan dari batubara plastis tersebut. Hasilnya seluruh batubara memuai (*swell*). Pemuaihan berhenti ketika batubara kembali membeku ketika produk cair selanjutnya terdekomposisi membentuk zat terbang.

2.6. Sifat Muai (*Swelling*)

Data dari plastisitas batubara digunakan untuk mengetahui *coking properties* batubara, demikian juga *swelling properties*. *Swelling properties* diukur dengan *free swelling index* (FSI) yaitu ukuran pembesaran volume batubara apabila dipanaskan di bawah kondisi pemanasan tertentu. Pembesaran volume ini ada kaitannya dengan sifat plastis batubara.

Batubara yang tidak menunjukkan sifat plastis pada waktu pemanasan juga tidak menunjukkan sifat pemuaihan. Sungguhpun hubungan antara pemuaihan dan plastisitas sangat kompleks dan sulit dipelajari, diyakini bahwa gas yang terbentuk selama batubara berada dalam bentuk plastis atau semi plastis, bertanggung jawab akan terjadinya pemuaihan.

Free swelling index digunakan untuk meramalkan kecenderungan batubara membentuk kokas bila dipanaskan pada alat tertentu. Batubara yang FSI-nya 2 atau kurang, bukan merupakan *coking coal* yang baik, sedangkan yang menunjukkan index antara 4 sampai 8 akan menunjukkan sifat *coking* yang lebih baik (FSI dapat mulai dari 0-9).

BAGIAN 3

PREPARASI DAN PENGOLAHAN BATUBARA

Pada suatu perusahaan batubara, biasanya dijumpai *Coal Preparation Plant* yaitu pabrik pengolahan batubara yang meliputi serangkaian proses meliputi: penyaringan batubara mentah (*raw coal screening*), peremukan (*crushing*), pencucian batubara (*coal washing*), pemisahan (*separation*), pencucian batubara dan daur ulang lumpur batubara (*slime recycling*). Proses ini akan dapat memisahkan batubara dari pengotor, menghilangkan pengotor mineral (*mineral impurities*) dari batubara mentah dan membaginya menjadi spesifikasi produk yang berbeda (<https://www.beidoou.com/mining/coal-preparation-plant.html>).

Batubara mentah sering bercampur dengan berbagai mineral pengotor dalam proses pembentukannya, dan dapat dipastikan dapat tercampur dengan batuan dan pengotor lainnya di *roof* dan *floor* dalam proses penambangan dan pengangkutan. Jadi batubara mentah harus disiapkan, tujuan utama persiapan batubara dapat diringkas sebagai berikut:

- (1) Menghilangkan pengotor dalam batubara *run-of-mine*, mengurangi abu dan sulfur, meningkatkan kualitas batubara dan memenuhi kebutuhan pengguna.
- (2) Membagi batubara menjadi kualitas dan spesifikasi yang berbeda untuk memenuhi kebutuhan pengguna, sehingga dapat menggunakan batubara secara efektif dan rasional serta menghemat biaya.
- (3) Setelah pencucian batu bara, *gangue* dapat dibuang di tempat, yang dapat mengurangi transportasi yang tidak perlu dan menciptakan kondisi untuk pemanfaatan *gangue* secara menyeluruh.
- (4) Pencucian batu bara dapat menghilangkan sebagian besar abu dan 50% – 70% sulfur pirit, serta mengurangi polusi udara akibat pembakaran batu bara. Ini adalah dasar dari teknologi batubara bersih.

Produk utama dari pabrik pengolahan batu bara adalah batu bara bersih dan batu bara *lump*, serta produk sampingan seperti batu bara sedang dan *slime*.

Pada skala laboratorium, tujuan prosedur preparasi adalah untuk menghasilkan contoh dengan massa dan ukuran yang sesuai dan representatif, menurut cara standar dari *gross sample*. Massa dan *top size* dari contoh akhir tergantung pada analisis atau uji yang akan dilakukan. Misalnya sampel untuk menentukan kandungan *moisture* harus dipisahkan sebelum pengecilan ukuran dilakukan. Proses preparasi contoh umumnya melalui proses pengecilan ukuran dan pengecilan massa.

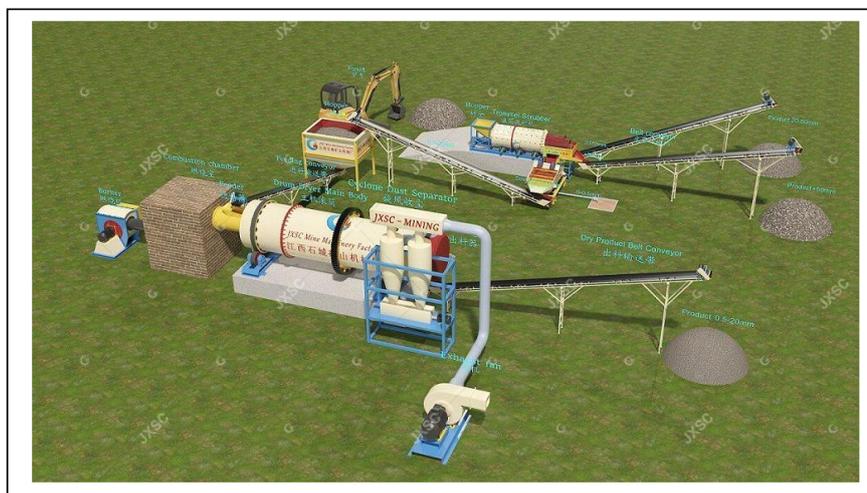
3.1. Reduksi Ukuran Butir

Pengecilan dari *gross sampel* idealnya dengan menggunakan cara mekanis misalnya dengan menggunakan peremuk dan kalau perlu penggerus sampai diperoleh ukuran yang dikehendaki. Alat mekanis pengecil ukuran misalnya *jaw crusher*, *hammer crusher*, *plat mill* dan *roll crusher*. Kadang-kadang menggunakan alat peremuk yang tahan kikisan untuk mencegah masuknya material asing seperti besi pada sampel. Pencampuran dilakukan agar supaya sampel hasil peremuk menjadi lebih homogen.

Reduksi masa dari *gross sample* dapat dilakukan dengan *riffle*. Sampel dimasukkan melalui *set slot* paralel dengan lebar seragam dan membagi material menjadi dua bagian yang sama. Satu bagian disisihkan dan satu bagian lagi dikecilkan massanya dengan prosedur yang sama. Cara lain untuk mengecilkan massa dari *gross sample* ialah dengan *cone and quartering*.

3.2. Coal Washing Plant

Coal washing plant adalah suatu unit pengolahan batubara yang dirancang untuk proses pencucian batubara (Gambar 3.1) Tujuan proses pencucian batubara adalah untuk mengurangi kandungan abu. Kandungan abu batubara *raw* dari hasil penambangan belum tentu sesuai dengan kualitas yang diinginkan oleh konsumen terutama batubara yang mempunyai kandungan abu besar. Oleh sebab itu kandungan abu tersebut harus dihilangkan dan prosesnya akan dilakukan oleh suatu unit pencucian batubara yang berfungsi untuk menghilangkan kotoran pada batubara. Material pengotor batubara akan menjadi abu jika batubara tersebut di bakar.



Gambar 3.1. Salah satu model *Coal Washing Plant*
(<https://mineraldressing.com/solution/coal-processing-plant>)

a. Kandungan Abu

Secara umum batubara tersusun atas tiga komponen (*Osborne, D. G., 1988*) yaitu:

- 1). Air, terdiri dari air bawaan (*inherent moisture*) dan air permukaan (*surface moisture*).
- 2). *Non organic matter/mineral matter*.
- 3). *Organic matter/coal matter* (material batubara), yang terdiri dari:

- Inherent mineral matter* (pengotor bawaan) yang didapatkan bersama-sama dengan proses pembentukan batubara.
- Extraneous mineral matter* (pengotor luar) terdapat bersama-sama dengan batubara akibat penambangan batubara yang kurang selektif.

Mineral matter dalam batubara akan meninggalkan sisa berupa abu apabila batubara dilakukan pembakaran. Kedua jenis *mineral matter* yang ada maka kemungkinan untuk penanganannya adalah sebagai berikut (*Escape Series on Coal, April 1987*):

- Apabila yang terdapat bersama-sama dengan batubara adalah *extraneous mineral matter*, maka pengotor ini dapat dipisahkan dari batubara dengan proses pencucian yang berdasarkan atas perbedaan sifat-sifat fisiknya.
- Apabila yang terdapat bersama-sama batubara adalah *inherent mineral matter* (pengotor bawaan) maka jenis pengotor ini hanya dapat dipisahkan dari batubara atas sifat kimianya.

b. Uji Endap Apung (*Sink and Float*)

Untuk dapat merencanakan suatu unit pencucian batubara, salah satu data yang harus ada adalah data hasil studi ketercucian batubara. Studi ketercucian batubara ini dilakukan dengan cara uji endap apung terhadap batubara yang diteliti dengan menggunakan media pemisah berupa cairan berat. Uji endap apung ini merupakan proses yang cukup baik untuk pencucian batubara karena dalam pelaksanaan pemisahan betul-betul berdasarkan SG media dan dalam pengambilan batubaranya ditunggu sampai betul-betul terjadi pemisahan antara pengotor dengan batubaranya. Alat yang digunakan yaitu *beaker glass*.

Tujuan dilakukan studi ketercucian batubara adalah :

- Mendapatkan gambaran mengenai kelakuan berbagai fraksi batubara, apabila dilakukan pencucian dengan menggunakan medium yang berbeda-beda.
- Mengetahui perolehan (*yield*) pencucian batubara dalam ukuran fraksi tertentu
- Mendapatkan berat jenis media yang paling baik, sehingga nantinya bisa dipilih media pencuci dalam mencapai persyaratan tertentu.
- Meramalkan (memperoleh) gambaran kesulitan yang akan dihadapi pada proses pencucian dengan menggunakan media tertentu dan untuk mengetahui *specific gravity* media pencucian yang paling baik.

c. Cairan Media Pemisah

Cairan media yang bisa digunakan dalam uji endap apung adalah cairan organik (*Osborne, D. G., 1988*) diantaranya :

- *Perchloroethylene* SG 1,60
- *Bromoform* SG 2,90
- *Tetrabromethane* SG 2,96

sedangkan cairan pengencer yang dapat digunakan (*Osborne, D. G., 1988, Kristiono, 1996*) adalah :

- *Petroleum spirit* SG 0,70

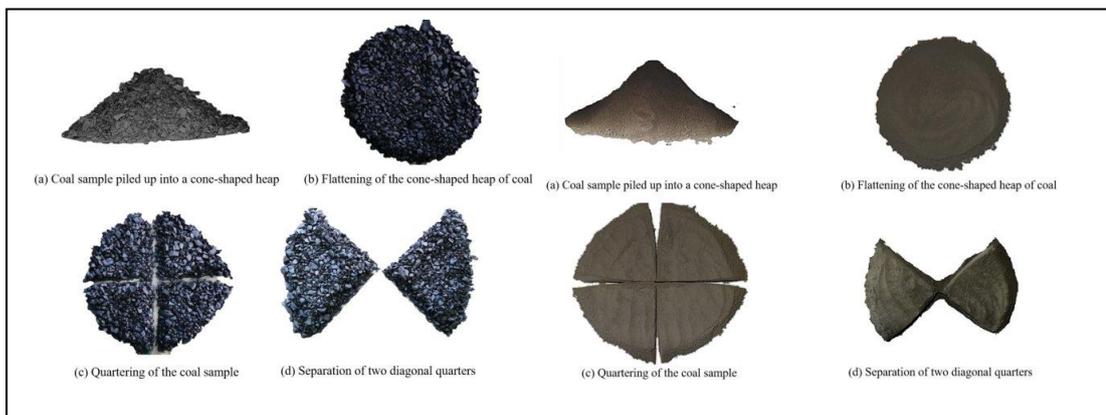
- *White spirit* SG 0,77
- *Toluene* SG 0,86
- *Solar* SG 0,83

d. Analisis Uji Endap Apung

Untuk melakukan uji endap apung, diperlukan beberapa prosedur sebagai berikut (*Leonard, J. W., 1979*):

1). Preparasi batubara

- Melakukan proses pengecilan ukuran terhadap batubara yang masih berbongkah relatif besar dengan menggunakan palu sehingga diperoleh ukuran terbesar sekitar 5 cm.
- Melakukan pengayakan terhadap masing – masing batubara awal dengan menggunakan opening ayakan : 25 mm ; 12,5 mm dan 4 mm sehingga dari hasil pengayakan diperoleh 4 fraksi ukuran.
- Penimbangan setiap fraksi hasil ayakan
- Memperkecil jumlah sampel pada masing-masing fraksi dengan menggunakan cara *coning and quartering* maupun *splitting*, sehingga didapat berat sampel untuk umpan percobaan (Gambar 3.2)
- Mengambil sampel untuk campuran dari ketiga sampel batubara di atas.



Gambar 3.2. Metode *coning-and-quartering* pada *dried coal samples* (kiri) dan *grinded coal samples* (kanan)(Pradan & Muhanta, 2020)

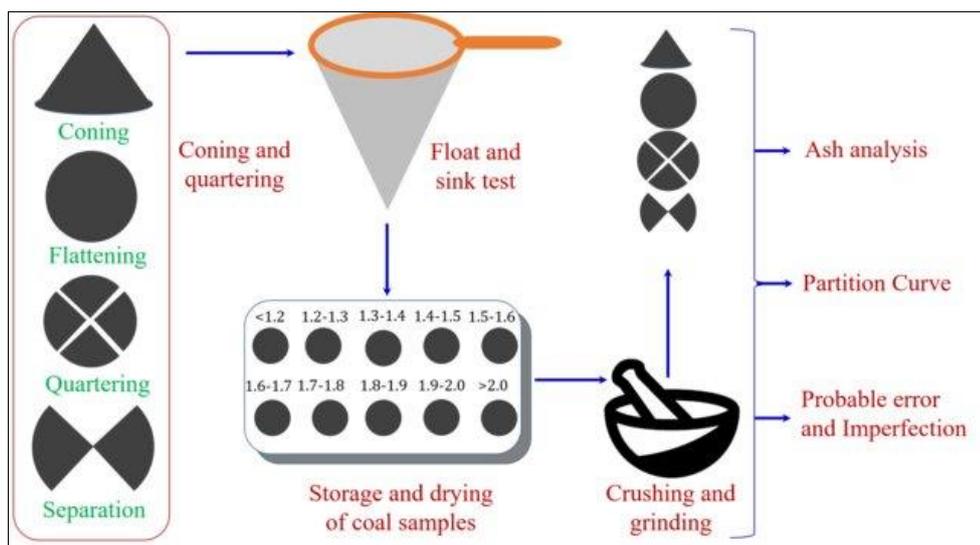
2). Persiapan cairan pemisah (media pemisah)

- Siapkan peralatan yang akan digunakan terdiri atas : *Beaker glass* volume 2 liter , alat pengaduk dan alat untuk mengukur SG cairan (hidrometer).
- Untuk mempercepat mendapatkan hasil, maka dilakukan secara *blending* terhadap 2 cairan media pemisah dengan SG yang berbeda.

- Campurkan bromoform dan solar sesuai dengan hasil perhitungan blending dan selanjutnya dilakukan pengecekan SG cairan media pemisah dengan hidrometer.

3). Proses Uji Endap Apung (*Osborne, 1988*)

- Uji endap apung dilakukan terhadap setiap fraksi dari hasil pengayakan. Percobaan dilakukan mulai SG cairan pemisah terkecil yaitu 1,30 dan untuk batubara yang mengapung diambil dilanjutkan pengeringan dan ditimbang beratnya.
- Untuk bagian yang mengendap SG nya lebih besar dari 1,30 maka bagian ini diambil serta dilanjutkan pada proses endap apung berikutnya yaitu menggunakan SG 1,40. Pada tahap ini perlakuannya juga sama yaitu yang mengapung diambil, dikeringkan dan selanjutnya juga ditimbang.
- Untuk bagian yang mengendap pada SG cairan 1,40 kemudian diambil dan dilanjutkan pada uji endap apung pada SG cairan pemisah 1,50 demikian seterusnya. Ilustrasi proses ini dapat dilihat pada Gambar 3.3.
- Uji endap apung dilakukan sampai dengan menggunakan cairan pemisah 1,80
- Batubara yang mengapung pada masing-masing SG media serta yang mengendap pada SG 1,8 tersebut kemudian dikeringkan, ditimbang serta dilakukan analisis abu
- Data yang didapatkan dibuat tabulasinya yang dilanjutkan pembuatan grafik. Lima grafik yang harus dibuat dari hasil uji endap apung untuk tiap-tiap fraksi (Nurkhamim, dkk., 2021) yaitu :
- *Specific gravity curve* : untuk menentukan yield dari suatu pencucian batubara yang menggunakan media pemisah dengan SG tertentu.



Gambar 3.3. Ilustrasi representasi metode *float-and-sink* untuk pemisahan batubara berdasarkan berat jenis (Pradan & Muhanta, 2020)

- *Cummulative ash curve* : untuk menentukan kadar abu maksimum yang ada dalam apungan.
- *Elementary ash curve* : untuk menentukan kadar abu maksimum dalam suatu sort.
- *Specifc gravitydistribution curve* : untuk menentukan sukar atau mudahnya pemisahan batubara pada SG media tertentu dengan melihat besarnya derajat kesulitan yang didapatkan dalam grafik.
- *Ash in refuse curve* : untuk menentukan kadar abu maksimum dalam endapan (*sink*).

BAGIAN 4

PENGEMBANGAN DAN PEMANFAATAN BATUBARA

Batubara merupakan sumber energi alternatif yang potensial sebagai pengganti minyak dan gas bumi. Pemanfaatan batubara sangatlah tepat karena potensinya yang melimpah dibandingkan potensi minyak dan gas bumi (Lestari dkk., 2016). Berdasarkan kenyataan tersebut usaha-usaha pengembangan dan pemanfaatan batubara masih terus dikembangkan.

Produksi batubara Indonesia untuk kebutuhan domestik mayoritas dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan bahan bakar PLTU. Pada tahun 2019 misalnya, sekitar 48% batubara di dalam negeri dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan PLTU sebesar 67,01 juta ton. Tren pemanfaatan batubara untuk PLTU juga terus meningkat seiring dengan tumbuhnya konsumsi energi listrik Indonesia (Gambar 4.1).

Dewan Energi Nasional (DEN) dalam *Indonesia Energy Outlook 2019* memproyeksikan permintaan listrik pada tahun 2050 akan mengalami kenaikan sebesar 9 kali lipat dari tahun 2018 atau mencapai 2.562 TWh dengan asumsi bahwa kerugian dalam transmisi dan distribusi sekitar 10%. DEN juga memperkirakan produksi listrik pembangkit berbahan bakar batubara masih akan tetap mendominasi pada masa mendatang. Meskipun pangsaanya terhadap total produksi listrik semakin menurun dari 57% di tahun 2018 menjadi 41% pada tahun 2050 (*Road Map Pengembangan dan Pemanfaatan Batubara 2021 – 2045*, Dirjen Mineral dan Batubara).

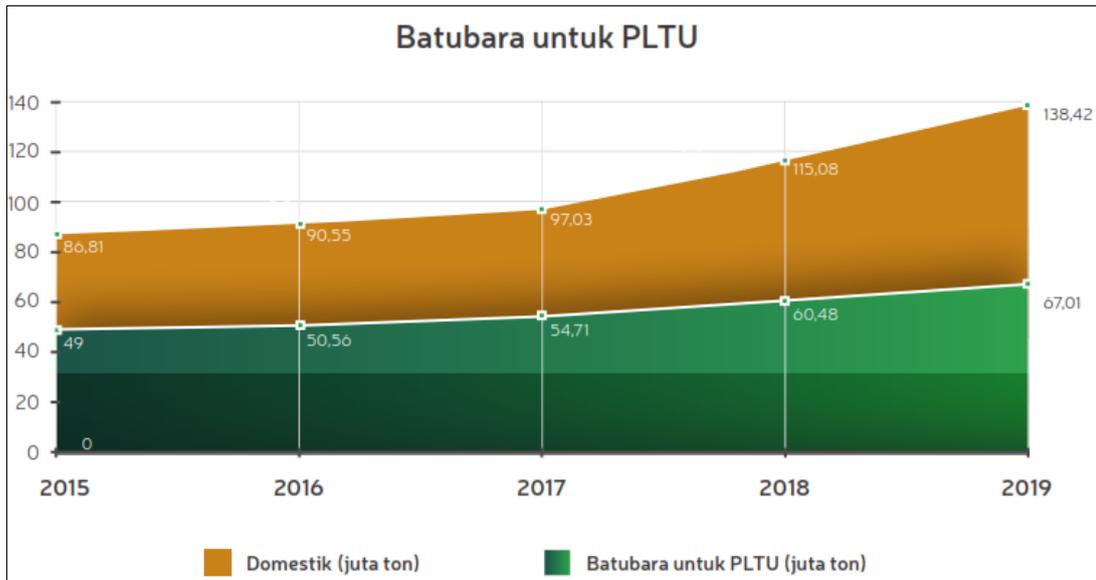
Selain untuk memenuhi kebutuhan energi listrik (PLTU) batubara sudah sejak lama juga digunakan sebagai bahan reduktor pada peleburan logam secara pirometalurgi (proses ekstraksi logam yang menggunakan panas atau dengan peleburan) untuk mengikat sulfida bijih. Pada perkembangan selanjutnya, hingga saat ini pengembangan dan penggunaan batubara sudah sangat bervariasi dan terus semakin berkembang.

4.1. PEMANFAATAN BATUBARA SEBAGAI SUMBER ENERGI

Hingga saat ini, penggunaan batubara di dunia sebagian besar untuk memenuhi kebutuhan energi, terutama untuk pembangkit listrik (PLTU), industri semen, industri metalurgi, industri keramik dan sebagian kecil untuk bahan bakar rumah tangga (briket batubara).

4.1.1. Penggunaan Batubara untuk PLTU (*Electric Steam Power Plant*)

Tidak dapat dipungkiri lagi, pada era modern ini kebutuhan listrik sudah menjadi kebutuhan primer bagi berjalanya roda perekonomian, industri maupun kehidupan sehari-hari kita. Salah satu jenis pembangkit listrik yang cukup mendominasi suplai kebutuhan listrik di dunia atau di Indonesia adalah pembangkit listrik tenaga uap atau PLTU (Wiratama, 2020).



Sumber: <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-buku-road-map-pengembangan-dan-pemanfaatan-batubara>.

Gambar 4.1. Konsumsi Batubara untuk PLTU

Pemanfaatan tenaga uap sudah dikenal cukup lama bahkan menjadi cikal bakal bermulanya revolusi industri. Contoh salah satu pabrik pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Sumber: <https://petrominer.com/pasokan-batubara-pltu-tanjung-jati-b-aman>

Gambar 4.2. Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU) Tanjung Jati B Jepara Jawa Tengah

4.1.1.1. Persyaratan dan Karakteristik Batubara untuk PLTU

Konsumen terbesar dari batubara adalah untuk pembangkit listrik khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Uap. Kebutuhan akan batubara untuk PLTU ini diperkirakan akan terus meningkat apabila terus dibangun PLTU-PLTU baru untuk memasok kebutuhan listrik. Hal-hal yang perlu diperhitungkan di dalam penggunaan batubara pada PLTU adalah: *performance* (unjuk Kerja), *availability*, *reliability*, dampak terhadap lingkungan, kendala dan karakteristik operasi serta dampak terhadap pemeliharaan (Lestari dkk., 2016).

Tinjauan terhadap aspek tersebut diatas semata-mata mempertimbangkan peralatan terpasang sesuai dengan rancang bangunnya dan seterusnya pengalaman tersebut menjadi dasar dalam penyempurnaan masa mendatang. Pengaruh kualitas batubara terhadap peralatan PLTU harus selalu diperhatikan karena kualitas batubara yang baik tentu akan berbeda dengan kualitas batubara yang buruk dalam pengaruhnya terhadap pemakaian batubara sebagai bahan bakar PLTU.

Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi penggunaan batubara untuk PLTU adalah (Sukandarrumidi, 1995):

High Heating Value (HHV)

Moisture Content

Volatil Matter

Fixed carbon

Ash Content

Sulphur Content

Coal Size

Hardgrove Grindability Index (HGI)

Ash Fusion Temperature

High Heating Value (HHV)

HHV sangat berpengaruh terhadap pengoperasian aspek *pulverizer, wind box, burner* dan pipa batubara. Semakin tinggi HHV maka aliran batubara setiap jamnya semakin rendah, sehingga keperluan *coal feeder* harus disesuaikan, untuk batubara dengan *moisture content* dan HGI yang sama, dengan HHV yang tinggi maka *mill* akan beroperasi di bawah kapasitas nominalnya (menurut desain) atau dengan kata lain *operating ratio*-nya menjadi lebih rendah. Sebagai contoh, berdasarkan persyaratan PLTU Suralaya rata-rata HHV adalah 5,242 kgcak/kg.

Moisture Content

Kandungan air (*moisture content*) mempengaruhi jumlah pemakaian udara primernya. Pada batubara dengan kandungan *moisture* yang tinggi akan membutuhkan udara primer lebih banyak guna mengeringkan batubara tersebut pada suhu ke luar *mill* tetap. Rata-rata kandungan *moisture* berdasarkan persyaratan PLTU (PLTU Suralaya) adalah 23,6 %.

Volatile Matter

Kandungan *volatil matter* mempengaruhi kesempurnaan pembakaran dan intensitas api. Menurut Waterhouse (1995), komposisi *volatile matter* yang dapat ditoleransi sebagai bahan bakar dengan batas minimum 40% bila tanpa bantuan minyak bumi, tetapi bila dengan memakai sedikit minyak bumi umumnya batas 35 % juga dapat ditoleransikan. Sebagai contoh, dalam satu perusahaan pembangkit listrik memakai standar minimum 25 % *volatile matter* maka dinyatakan bahwa 23 % *volatile coal* tidak terbakar karena hanya masalah pada *lower boiler loads* (beban ketel uap terendah) menurun hingga 40 %. Berdasarkan persyaratan PLTU (PLTU Suralaya) rata-rata *volatile matter* adalah 30,3 %.

Fixed carbon

Semakin tinggi *fuel ratio* maka karbon yang tidak terbakar semakin banyak. *Fuel ratio* dihitung dari perbandingan jumlah *fix carbon* dibagi dengan jumlah *volatile mater*.

Ash Content

Kandungan abu akan terbawa bersama gas pembakaran melalui ruang bakar dan daerah konversi dalam bentuk *fly ash* dan *bottom ash*. Semakin tinggi kandungannya abu tergantung komposisinya, maka akan semakin tinggi tingkat pengotor (*fouling*) keausan dan korosi peralatan yang dilaluinya. Berdasarkan persyaratan PLTU (PLTU Suralaya) maka kandungan abu rata-rata adalah 7,8 %.

Sulphur Content

Kandungan sulfur berpengaruh terhadap tingkat korosi sisi dingin yang terjadi pada elemen pemanas udara, terutama apabila suhu kerja lebih rendah dari titik embun sulfur, di samping berpengaruh terhadap efektifitas penangkapan abu pada peralatan *electrostatic precipitator*. Berdasarkan persyaratan (PLTU Suralaya) maka rata-rata kandungan sulfur yang digunakan adalah 0,4 %.

Coal Size

Ukuran butir batubara tidak boleh terlalu halus minimal dibatasi < 3 mm karena bila tidak memenuhi syarat tersebut debunya akan mengotori lingkungan sekitarnya.

Hardgrove Grindability Index (HGI)

Kapasitas *mill (Pulverizer)* dirancang pada *HGI* tertentu. Untuk *HGI* lebih rendah kapasitasnya harus lebih rendah dari nilai patokannya agar menghasilkan *fineness* yang sama. Menurut Waterhouse, 1995 dalam Lestari dkk., 2016, banyak batubara yang mempunyai nilai *HGI* 45-55 yang diinginkan oleh konsumen dan nilai tersebut juga tergantung dari kepentingannya yang biasanya memakai standar harga tertentu. Nilai *HGI* bermacam-macam tergantung dari kandungan *moisture*-nya. *HGI* tidak bisa dipakai standar untuk menentukan tingkat kekerasan batubara. Sebagai contoh, antrasit dan beberapa lignit mungkin salah satu kasus yang unik, dimana harga *HGI*-nya hampir sama dan keduanya juga sama-sama sulit untuk digerus, padahal secara umum antrasit merupakan batubara yang keras sedangkan lignit cenderung batubara yang lunak. Ketika konsumen ingin batubara tersebut dicampur, maka proses pencampurannya dilakukan dengan penekanan dan semakin mudah batubaranya untuk digerus maka batubara tersebut harus memiliki harga *HGI* yang semakin tinggi

Ash Fusion Temperature

Ash Fusion Temperature akan mempengaruhi tingkat *fouling*, *slagging*, *corrosion* dan operasi *soot blower*. *Ash Fusion Temperature* ini didesain untuk memberikan indikasi kecenderungan abu untuk membentuk endapan di atas permukaan ketel uap tersebut.

Persyaratan mutu batubara yang dibutuhkan oleh industri semen unit operasi dengan efektifitas yang cukup tinggi, yaitu (Sukandarrumidi, 1995):

- Nilai bakar(kalor) net cukup tinggi, yaitu > 6000 cal/gr
- *Volatil matter* medium maksimum 36-42 %
- *Total Moisture* maksimum 12 %
- Kadar abu maksimum 6 %
- Kadar sulfur maksimum 0,8 %
- Kadar alkali dalam abu maksimum 2 %

Batubara yang tidak memenuhi persyaratan diatas akan menghasilkan produktivitas yang rendah. Persyaratan tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut (Lestari dkk., 2016):

- 1) Nilai bakar (kalor) net cukup tinggi, yaitu $> 6000 \text{ cal/gr}$, agar nantinya pemakaian batubara dapat menghasilkan target-target yang diharapkan pada operasi pembakaran. Batubara yang dipergunakan sebagai bahan bakar dalam industri semen harus diperhatikan panas pembakaran, hasil-hasil dan sisa-sisa pembakaraan yang perlu diketahui terutama apabila hal-hal tersebut dapat mengganggu kualitas semen yang akan dihasilkan. Nilai kalor net berupa nilai kalor pembakaran dihitung dalam keadaan semua air berwujud gas. Nilai kalor gross berupa nilai kalor pembakaran diukur dalam keadaan semua berwujud cair. Bila membakar batubara dengan *fire grate* (panggang api) maka panjang nyala yang dihasilkan tergantung besarnya kandungan *volatile matter*-nya. Batubara dengan kadar *volatile matter* yang tinggi, akan menghasilkan nyala yang panjang di atas *fire grate* dan batubara dengan kadar *volatile matter* yang rendah, akan menghasilkan nyala yang pendek. Oleh karena itu antrasit biasanya disebut dengan *shot flaming coal* (batubara bernyala pendek) dan bitumine sebagai *long flaming coal* (batubara dengan nyala panjang). Sebenarnya batubara akan menghasilkan hasil yang berbeda bila dibakar dalam bentuk batubara halus di dalam tanur putar. *Long flaming coal* bila dibakar daam tanur putar sebagai batubara halus akan terurai dengan cepat dan *volatile matter* yang menguap akan terbakar dengan cepat sehingga akan menghasilkan nyala pendek. *Short flaming coal* yang mengandung sedikit *volatile matter*, bila dibakar dalam tanur putar, sebagai batubara yang halus akan terurai secara lambat, sehingga akan terbakar dalam jarak yang lebih panjang atau akan menghasilkan nyala api yang panjang (Sukandarrumidi, 1995).
- 2) *Volatil matter* medium maksimum 36-42 % agar dapat menghasilkan target-target yang diharapkan dari operasi pembakaran
- 3) *Total Mousture* maksimum 12 % agar tidak menyulitkan pada operasi *Handling*.
- 4) Kadar abu maksimum 6 % agar tidak menyulitkan dalam operasi *Handling*. Kadar abu didapat dari analisa abu padatan bercampur dengan klinker dan mempengaruhi kualitas semen walaupun demikian kadar abu batubara Indonesia biasanya berkisar antara 5 %- 20 %.
- 5) Kadar sulfur maksimum 0,8 % agar tidak terjadi gangguan dalam operasi tanur dan penurunan kualitas semen.
- 6) Kadar alkali dalam abu maksimum 2 % untuk mencegah terjadinya penurunan kualitas semen.
- 7) Ukuran batubara (*raw coal*):

+100 mm	= 0%
-100+50 mm	= 70%
-50 +25 mm	= 25 %
-25 -+15 mm	= 15 %
-15 mm	= 0 %

Dengan ukuran batubara tersebut dimaksudkan agar tidak terjadi pembakaran selama pengumpanan makin banyak mengandung butiran-butiran halus maka batubara akan mudah terbakar

- 8) Variasi kualitas di atas lebih dari 10% dengan nilai-nilai yang tercantum, dimaksudkan sebagai persyaratan untuk mencapai operasi pembakaran yang stabil dapat terpenuhi.

4.1.1.2. Metode Pembakaran Batubara di PLTU

Pembakaran batubara merupakan proses reaksi oksidasi antara unsur-unsur yang terdapat dalam batubara dengan oksigen. Reaksi oksidasi ini berlangsung pada permukaan butiran batubara. Semakin halus ukuran butir batubara maka akan semakin luas permukaan butiran, sehingga proses pembakaran batubara akan semakin sempurna.

Ada tiga metode pembakaran batubara pada *pullverizer Boiler Power Plant/PLTU* (Setyowati, dkk. 2013), yaitu:

1). *Fix Bed Combustion*

Metode pembakaran batubara dengan ukuran butir umpan yang masuk ruang bakar (*burner*) adalah -100mm. Setiap butir batubara relatif agak lama berada di ruang bakar, sehingga turunnya batubara dalam ruang bakar juga berjalan lambat. Pada bagian bawah ruang bakar didapatkan adanya *grate* sehingga batubara akan tertahan di atas *grate*. Temperatur pembakaran dapat mencapai 1.000°C.

2). *Fluidized Bed Combustion*

Metode pembakaran ini menggunakan ukuran butir batubara umpan lebih halus, dimasukkan ke dalam *burner*, yaitu sekitar 1-5 mm. Ukuran butir umpan batubara lebih halus sehingga proses pembakaran lebih bagus. Batubara dimasukkan ke dalam *burner* dalam suatu aliran bersama-sama udara dengan cara dihembuskan. Temperatur pembakaran bisa mencapai 950°C.

3). *Pullverizer Bed Combustion*

Metode pembakaran ini menggunakan ukuran butir batubara yang jauh lebih halus dibanding metode *fixed bed combustion* maupun metode *fluidized Bed Combustion*. Ukuran batubara yang digunakan sebagai umpan adalah -200 mesh. Batubara halus dimasukkan ke dalam *burner* dengan cara dihembuskan menggunakan media udara. Temperatur pembakaran dapat mencapai 1250 °C -1600 °C

Kerja *pullverizer* pada suatu system *boiler* dipengaruhi oleh beberapa parameter sebagai berikut (Setyowati, dkk. 2013):

1). *Coal size* (ukuran butir umpan batubara)

Ukuran butir batubara yang dapat diterima *pullverizer* umumnya -40 mm. bila ukuran umpan lebih besar, maka proses penggilingan akan lebih lama.

2). *Hardgroove Gridability Index (HGI)*

Nilai ini menyatakan tingkat kemudahan atau tingkat kesulitan batubara untuk digiling halus menjadi ukuran -200 mesh. Nilai *HGI* berkisar antara 30-110. Semakin kecil angka *HGI* maka batubara akan semakin sukar untuk digerus halus, serta semakin besar energi yang digunakan untuk penggilingan

3). *Mineral matter* (kandungan mineral pengotor)

Kadar mineral matter yang tinggi serta komposisi mineral pengotor dalam batubara akan mempengaruhi nilai HGI.

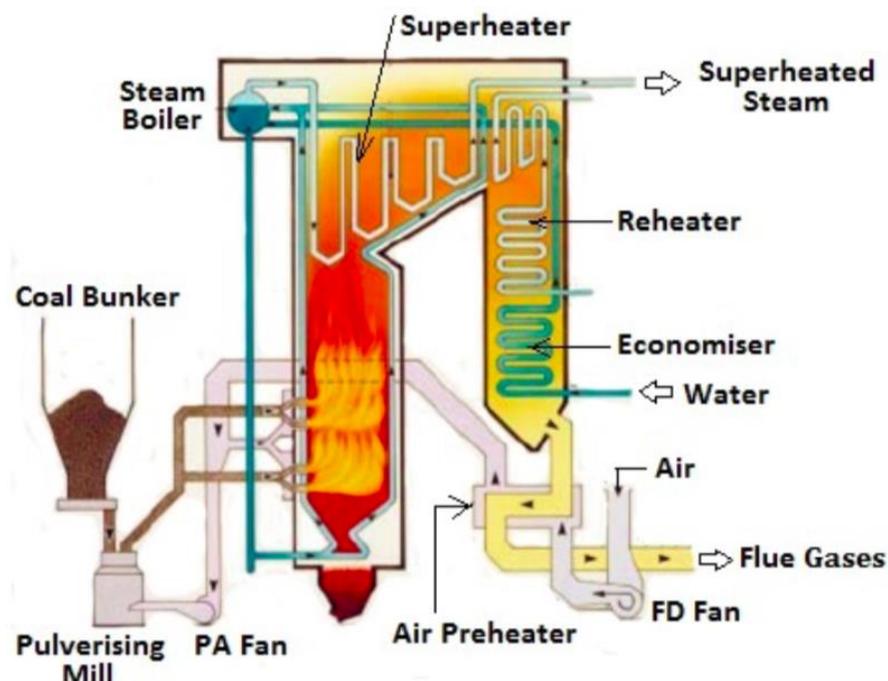
4). *Moisture content* (kadar air)

Kandungan air bebas (air permukaan) pada baubara akan berpengaruh terhadap sifat batubara, yaitu sifat lengket. Untuk batubara yang lengket akan menurunkan kapasitas penggilingan.

4.1.1.3. Zona dan Bagian-Bagian Penting *Boiler Power Plant*

Bagian-bagian penting dari suatu PLTU adalah apa yang disebut sebagai *Coal Fired Boiler Power Plant* atau ruang bakar dan ketel uap (*boiler*). Cara kerja dari sistem ini pada dasarnya adalah bahan bakar berupa batu bara, gas dan lain sebagainya dibakar untuk menghasilkan energi panas, kemudian energi panas tersebut digunakan untuk memanaskan air yang terjadi pada ketel uap (*boiler*), air yang panas tersebut kemudian berubah fasa menjadi uap bertekanan tinggi dan uap tersebut digunakan untuk memutar turbin. Kelihatannya sederhana, tapi pada kenyataannya cukup banyak komponen-komponen yang terdapat pada satu sistem ini. Karena kompleksitasnya, fokus pembahasan hanya pada komponen *boiler* dengan bahan bakar batu bara.

Boiler untuk pembangkit listrik pada umumnya berbentuk kotak dengan ketinggian yang memanjang keatas, kemudian berbelok pada bagian atas dan kembali turun menghadap ke bawah, menyerupai huruf "n". Struktur dasarnya secara umum adalah bagian bawah untuk mengakomodasi pembakaran, kemudian bagian atas dan belokan dipenuhi dengan pipa-pipa berisi air dan steam untuk mengambil panas dari pembakaran, dan pada daerah aliran turun terakhir gas buang (*flue gas*) dimanfaatkan kembali panasnya untuk memanaskan udara yang akan kembali masuk dan kemudian menuju proses penyaringan baik menggunakan *scrubber* maupun perangkat debu elektrostatis (Gambar 4.3).



Gambar 4.3. Skema *boiler* secara umum (Wiratama, 2020)

Bagian-bagian penting pada suatu system pembangkit listrik tenaga uap terdiri dari beberapa bagian dan komponen sebagai berikut:

a. Zona Radiasi

Pada mulanya, pembakaran ini diinisiasi menggunakan bahan bakar diesel. Ketika pembakaran sudah cukup memadai, barulah kemudian batu bara disuplai ke dalam ruang bakar (bagian bawah *boiler*). Masuknya (*inlet*) bahan bakar biasanya bersebelahan atau dikelilingi oleh *inlet* udara sebagai sumber oksigen pembakaran. Sebelum masuk ke ruang bakar, pertama-tama batu bara dimasukkan ke dalam *pulverizer* atau penghancur batu bara agar menjadi butiran-butiran kecil, sehingga proses pembakaran dapat terjadi dengan lebih efektif dan efisien. Pada zona pembakaran ini pula, dinding-dinding dari ruangan ini terdiri dari jaringan pipa yang berisi air dan uap, dinding ini disebut juga dengan *water wall*. Karena suhu yang cukup tinggi, dan api pembakaran berapa pada bagian tengah ruang bakar, proses perpindahan kalor yang paling dominan terjadi pada zona ini adalah radiasi, sehingga pada daerah ini sering dikategorikan sebagai zona radiasi.

Terdapat pula berbagai macam pola pembakaran yang diterapkan dalam ruang bakar ini, misalkan *tangential firing* yang menyemburkan api dari sudut-sudut ruangan dan membentuk bola api, ada juga tipe penyemburan bahan bakar yang saling berhadapan, bahkan ada juga tipe pembakaran dengan pencampuran batubara menggunakan pasir atau dikenal dengan istilah *fluidized bed* dan masih banyak lagi variasi lainnya, mengingat teknologi ini sudah cukup matang dan digunakan cukup lama.

b. Zona Konveksi

Setelah pembakaran terjadi pada zona radiasi, secara alamiah (dan beberapa dibantu oleh *fan*) udara panas akan bergerak ke atas. Pada bagian atas zona radiasi, pipa-pipa yang sangat banyak jumlahnya sudah menghadang aliran gas panas tersebut. Pada pipa-pipa tersebut terdapat sebagian air dan sebagian uap air yang berubah fasa karena pemanasan dari gas panas tersebut (pada tipe *supercritical boiler*, perubahan air menjadi uap terjadi secara spontan tanpa melalui percampuran air dan uap). Karena perpindahan panas yang dominan antara gas panas dan pipa, maupun pipa dan air atau uap di dalam pipa adalah konveksi, maka zona ini sering disebut juga dengan istilah zona konveksi.

c. Superheater

Dalam zona konveksi ini, *tube-tube* yang menghadang pertama kali gas panas dinamakan dengan *superheater*. Karena pada bagian ini air yang telah sempurna menjadi uap memiliki suhu yang sangat tinggi dan siap digunakan untuk memutar turbin. Uap ini disebut juga dengan uap kering, *dry steam* atau *superheated steam*.

d. Reheater

Reheater digunakan untuk memanfaatkan suhu *fluegas* yang masih cukup panas setelah melewati *superheater*. Uap hasil pemanasan *reheater* juga digunakan untuk memutar turbin pada *secondary stage*.

e. Economizer

Proses *tubing* terakhir dari zona konveksi adalah *economizer*. Pada bagian ini, gas panas yang sudah diambil panasnya oleh *superheater* dan *reheater* masih memiliki sebagian kalor yang masih bisa dimanfaatkan. Oleh karena itu, untuk meningkatkan efisiensi secara keseluruhan, panas dari *fluegas* setelah *reheater* ini digunakan untuk memanaskan sistem *feed water* yang menurunkan kalor total yang dibutuhkan oleh sistem untuk merubah air menjadi uap.

f. *Air-Preheater*

Sebelum sepenuhnya dingin, *flue gas* yang melewati *economizer* dimanfaatkan kembali panasnya untuk memanaskan udara yang akan dimasukkan kedalam sistem *boiler* untuk pembakaran. Pemanasan ini berfungsi untuk mengurangi jumlah bahan bakar yang dibutuhkan untuk memanaskan udara masuk sampai suhu yang diinginkan setelah pembakaran yang pada akhirnya meningkatkan efisiensi total.

4.1.1.4. Prinsip Kerja Boiler

Boiler atau ketel uap adalah suatu perangkat mesin yang berfungsi untuk mengubah air menjadi uap. Proses perubahan air menjadi uap terjadi dengan memanaskan air yang berada didalam pipa-pipa dengan memanfaatkan panas dari hasil pembakaran bahan bakar. Pembakaran dilakukan secara kontinyu didalam ruang bakar dengan mengalirkan bahan bakar dan udara dari luar.

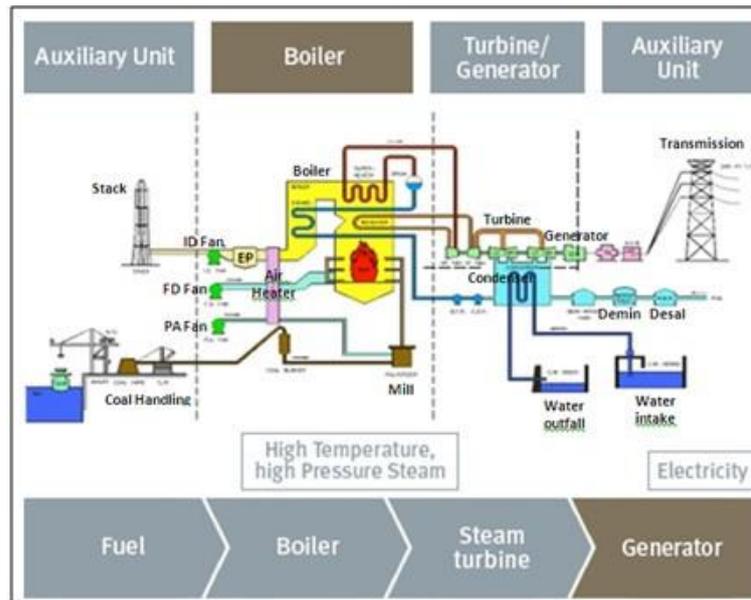
Uap yang dihasilkan boiler adalah uap *superheat* dengan tekanan dan temperatur yang tinggi. Jumlah produksi uap tergantung pada luas permukaan pemindah panas, laju aliran, dan panas pembakaran yang diberikan. *Boiler* yang konstruksinya terdiri dari pipa-pipa berisi air disebut dengan *water tube boiler*. Pada unit pembangkit, *boiler* juga biasa disebut dengan *steam generator* (pembangkit uap) mengingat arti kata *boiler* hanya pendidih, sementara pada kenyataannya dari *boiler* dihasilkan uap *superheat* bertekanan tinggi.

Ditinjau dari bahan bakar yang digunakan, maka PLTU dapat dijalankan dengan bahan bakar batubara, bahan bakar minyak, bahan bakar gas dan bahan bakar nuklir (PLTN). Jenis PLTU batu bara masih dapat

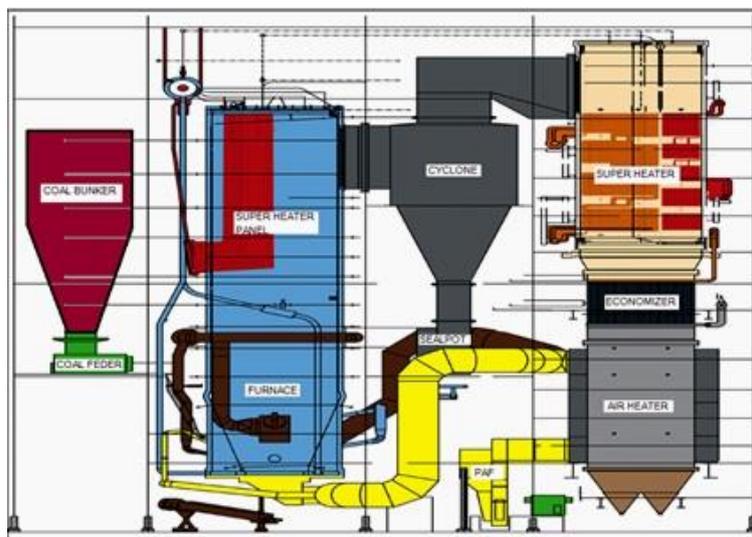
berdasarkan proses pembakarannya, yaitu PLTU dengan pembakaran batu bara bubuk (*Pulverized Coal / PC Boiler*) seperti pada Gambar 4.4 dan PLTU dengan pembakaran batu bara curah (*Circulating Fluidized Bed*) seperti pada Gambar 4.5.

Perbedaan antara PLTU Batu bara dengan PLTU minyak atau gas adalah pada peralatan dan sistem penanganan dan pembakaran bahan bakar serta penanganan limbah abunya. PLTU batubara mempunyai peralatan bantu yang lebih banyak dan lebih kompleks dibanding PLTU minyak atau gas. PLTU gas merupakan PLTU yang paling sederhana peralatan bantunya.

Ditinjau dari tekanan ruang bakar *boiler*-nya, PLTU dapat dibedakan menjadi tiga tipe, yaitu: *Pressurised Boiler*, *Balanced Draft Boiler* (Gambar 4.6) dan *Vacuum Boiler*.

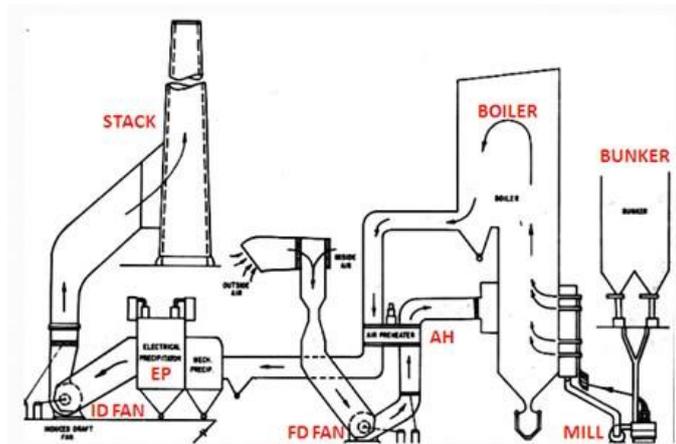


Gambar 4.4. Coal (PC) Boiler Batubara (Rakhman, 2020)



Gambar 4.5. Layout Circulating Fluidized Boiler (CFB) (Rakhman, 2020)

Sistem pengaturan tekanan ruang bakar (*furnace pressure*) biasa disebut *draft* atau tekanan statik di dalam ruang bakar dimana proses pembakaran bahan bakar berlangsung. PLTU dengan *pressurised boiler* (tekanan ruang bakar positif) digunakan untuk pembakaran bahan bakar minyak atau gas. Tekanan ruang bakar yang positif diakibatkan oleh hembusan udara dari kipas tekan paksa (*Forced Draft Fan, FDF*). Gas buang keluar dari ruang bakar ke atmosfer karena perbedaan tekanan.



Gambar 4.6. Skema *Balanced Draft Boiler* (Rakhman, 2020)

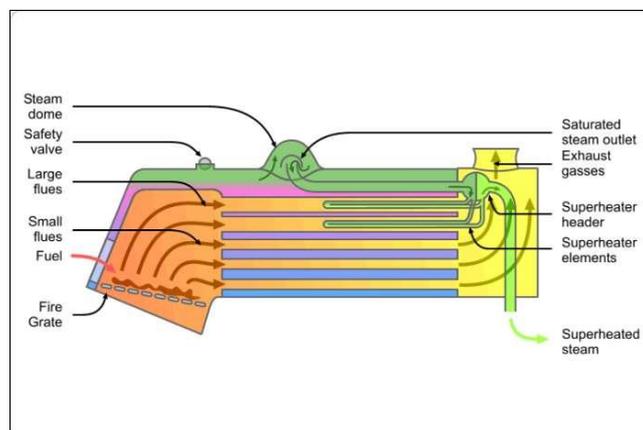
PLTU dengan *Balanced Draft Boiler* (tekanan berimbang) biasa digunakan untuk pembakaran bahan bakar batubara. Tekanan ruang bakar dibuat sedikit dibawah tekanan atmosfer, biasanya sekitar $-10 \text{ mm H}_2\text{O}$. Tekanan ini dihasilkan dari pengaturan dua buah kipas, yaitu kipas hisap paksa (*Induced Draft Fan, IDF*) dan kipas tekan paksa (*Forced Draft Fan, FDF*). FDF berfungsi untuk menyuplai udara pembakaran menuju ruang bakar (*furnace*) di *boiler*, sedangkan IDF berfungsi untuk menghisap gas dari ruang bakar dan membuang ke atmosfer melalui cerobong. Sedangkan PLTU dengan *vacum boiler* tidak dikembangkan lagi, sehingga saat ini tidak ada lagi yang menerapkan PLTU dengan *boiler* bertekanan negatif.

4.1.1.5. Jenis-Jenis *Boiler*

Jenis-jenis *boiler* yang biasa digunakan pada PLTU antara lain sebagai berikut:

a. *Fire Tube Boiler*

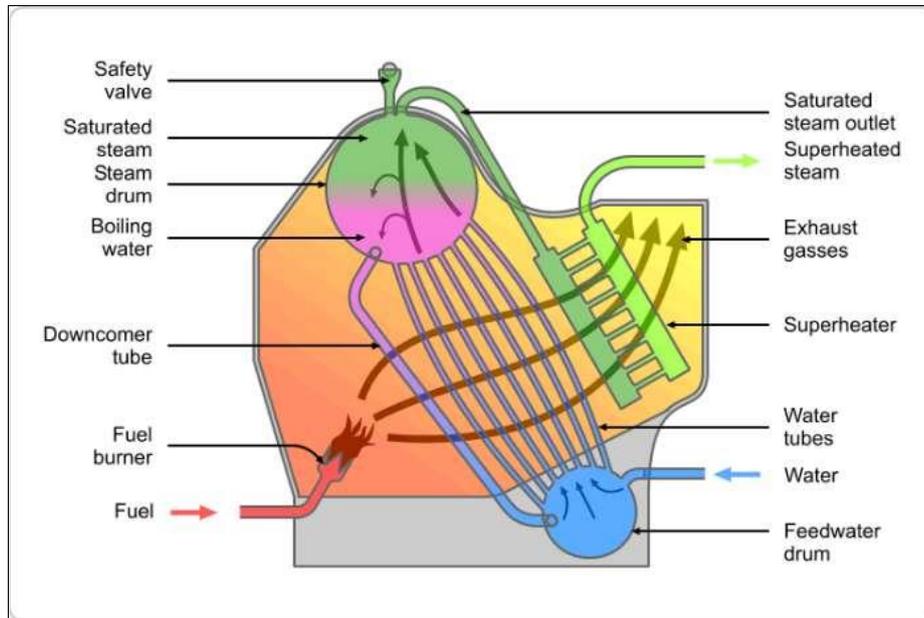
Pada *fire tube boiler*, air umpan *boiler* terletak di dalam sel dan akan diubah menjadi *steam*. Gas panas akan melewati pipa-pipa. Umumnya, *fire tube boiler* digunakan untuk kapasitas *steam* kecil dan bertekanan rendah-sedang (Gambar 4.7).



Sumber: <https://rakhman.net/power-plants-id/prinsip-kerja-boiler/>

Gambar 4.7. *Fire Tube Boiler* (Rakhman, 2020)

b. Water Tube Boiler



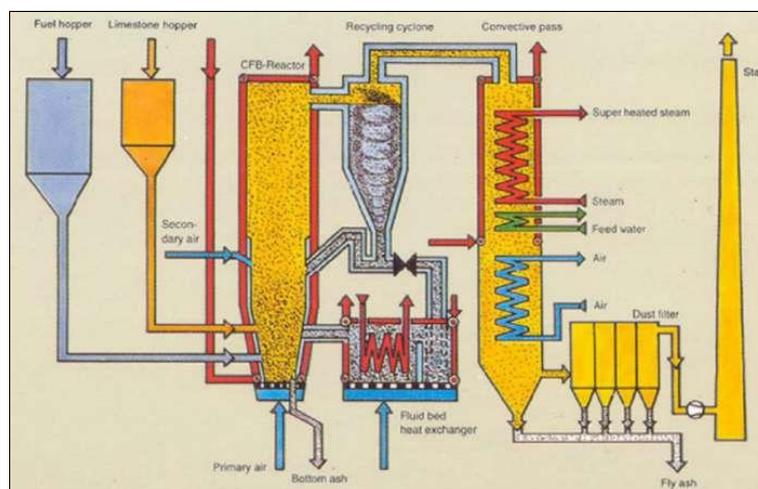
Sumber: <https://rakhman.net/power-plants-id/prinsip-kerja-boiler/>

Gambar 4.8. *Water Tube Boiler* (Rakhman, 2020)

Air umpan untuk *boiler* akan dialirkan melalui pipa, kemudian masuk ke dalam drum. *Steam* akan terbentuk pada daerah uap di dalam drum. *Steam* ini dihasilkan dari pemanasan air oleh gas pembakar. Berbeda dengan *fire tube boiler*, *water tube boiler* lebih cocok untuk kebutuhan *steam* bertekanan tinggi (Gambar 4.8)

3. Boiler FBC

Fluidized Bed atau *FBC boiler* memiliki beberapa kelebihan seperti rancangan yang lebih kompak, fleksibel terhadap bahan bakar, efisiensi pembakaran tinggi, serta menghasilkan emisi yang rendah (Gambar 4.9). Umumnya menggunakan bahan bakar berupa batu bara.

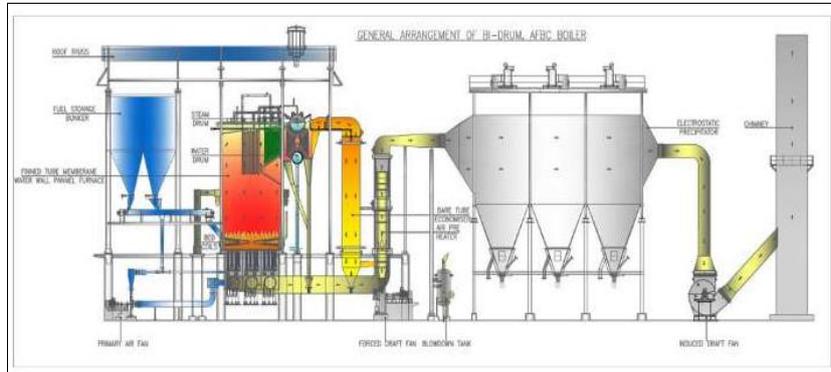


Sumber: <https://rakhman.net/power-plants-id/prinsip-kerja-boiler/>

Gambar 4.9. *Boiler Tipe FBC* (Rakhman, 2020)

4. Boiler tipe *Atmospheric Fluidized Bed Combustion (AFBC)*

AFBC merupakan kepanjangan untuk *atmospheric fluidized bed combustion*. Peralatannya berupa *shell boiler* konvensional yang ditambah dengan *fluidized bed combustor*. Bahan bakarnya juga menggunakan batu bara (Gambar 4.10).

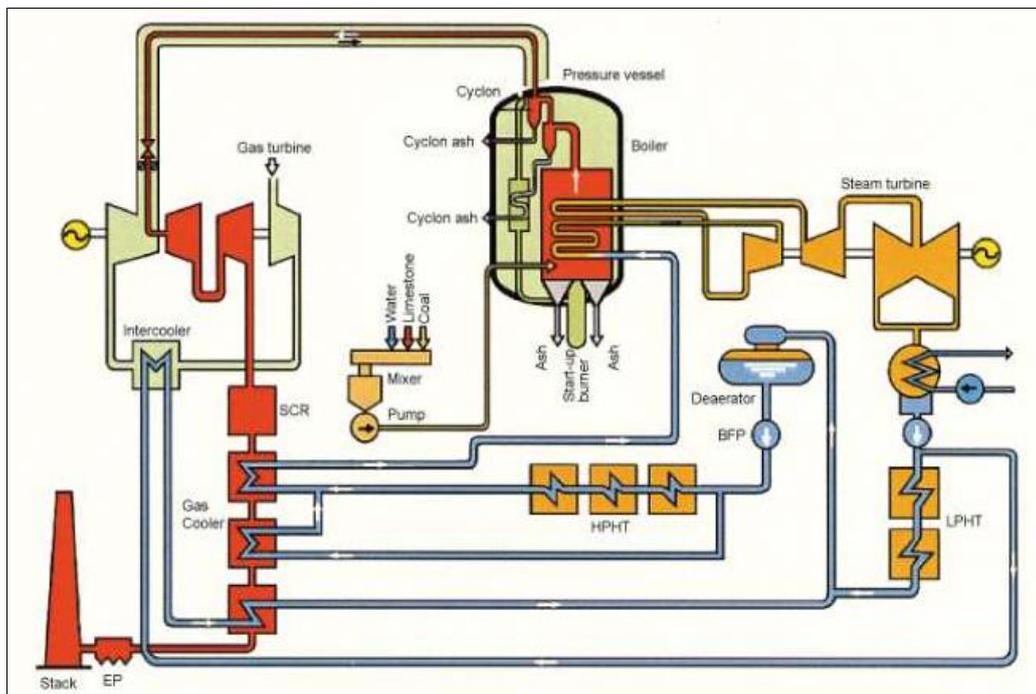


Sumber: <https://rakhman.net/power-plants-id/prinsip-kerja-boiler/>

Gambar 4.10. Layout boiler tipe AFBC (Rakhman, 2020)

5. Boiler tipe *Pressurized Fluidized Bed Combustion (PFBC)*

Boiler *Pressurized Fluidized Bed Combustion* atau PFBC memiliki kompresor untuk memasok udara dan pembakaran dilakukan pada sebuah tangki bertekanan. Efisiensi pembakaran sangat tinggi, uap dihasilkan di dalam dua pipa, yaitu di *bed* dan satu pipa lagi yang berada di bagian atasnya (Gambar 4.11).

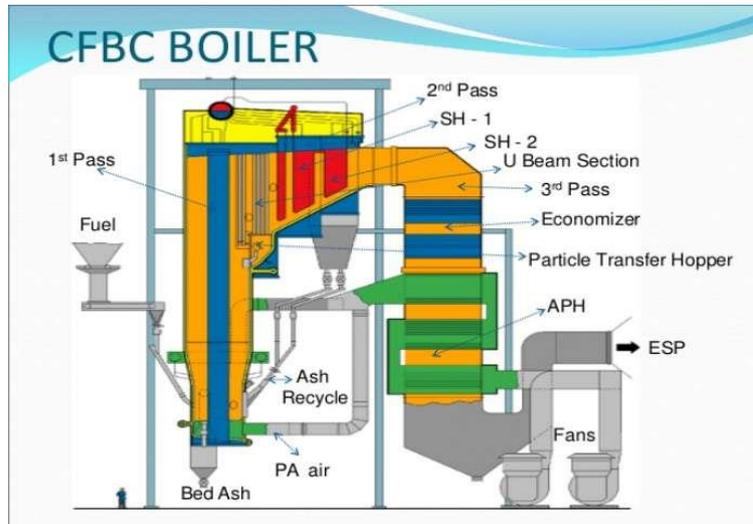


Sumber: <https://rakhman.net/power-plants-id/prinsip-kerja-boiler/>

Gambar 4.11. Layout Boiler tipe PFBC (Rakhman, 2020)

6. Boiler tipe *Atmospheric Circulating Fluidized Bed Combustion* (CFBC)

CFBC merupakan kepanjangan untuk *Atmospheric Circulating Fluidized Bed Combustion* (Gambar 4.12). Penggunaan *CFBC boiler* lebih sering ditemukan di industri karena lebih hemat jika dibandingkan dengan DFBC.



Sumber: <https://rakhman.net/power-plants-id/prinsip-kerja-boiler/>

Gambar 4.12. Layout *Boiler* tipe CFBC (Rakhman, 2020)

Selain 6 jenis boiler yang telah disebutkan di atas, masih ada beberapa lagi jenis boiler lain yang biasa digunakan, seperti: *pulverized fuel boiler*, *stocker fired boiler*, boiler limbah panas, dan lain-lain.

4.1.2. Penggunaan Batubara pada Industri Semen

Pada industri pembuatan semen, batubara digunakan sebagai bahan bakar di dalam *kiln* untuk membentuk klinker yang merupakan bahan dasar semen. Dalam pemanfaatannya, batubara harus diketahui terlebih dahulu kualitasnya dengan pertimbangan sifat-sifat pokok batubara sebagai bahan bakar dengan cara melakukan analisis kimia antara lain analisis proksimat, sulfur, dan nilai kalor. Hal ini dimaksudkan agar spesifikasi mesin atau peralatan yang memanfaatkan batubara sebagai bahan bakarnya sesuai dengan mutu batubara yang digunakan, sehingga mesin-mesin tersebut dapat berfungsi optimal, tahan lama, serta efisiensi (Arya dkk., 2019).

4.1.2.1. Bahan Baku dan Jenis-Jenis Semen

Semen adalah serbuk atau tepung yang terbuat dari batugamping dan material lainnya yang dipakai untuk membuat beton, merekatkan batu bata ataupun membuat tembok (KBBI, 2008). Istilah semen berasal dari bahasa Latin, yaitu *caementum* yang artinya bahan perekat (Gambar 4.13).



Sumber:<https://www.kajianpustaka.com/2018/12/jenis-bahan-baku-dan-proses-pembuatan-semen.html>

Gambar 4.13. Semen digunakan sebagai bahan perekat batubata, *paving block* dan lain sebagainya.

Semen sudah dikenal pada zaman Mesir kuno pada abad ke 5. Pada saat itu semen dibuat dari kalsinasi atau pembakaran batugamping yang digunakan untuk membangun piramida dan bangunan besar lainnya. Sedangkan bangsa Romawi dan Yunani kuno membuat semen menggunakan *slag* vulkanik yang berasal dari gunung berapi. *Slag* vulkanik dicampur dengan kapur gamping (*quicklime*) serta gypsum yang kemudian disebut sebagai *pozzolan cement* (Rahadja, 1990).

Semen merupakan suatu bahan yang bersifat hidrolis, yaitu bahan yang akan mengalami proses pengerasan pada pencampurannya dengan air ataupun larutan asam. Bahan dasar semen terdiri dari tiga macam, yaitu *clinker*/terak semen sebanyak 70% - 95% (hasil olahan pembakaran batugamping, pasir silika, pasir besi dan tanah liat), gypsum 5% dan material tambahan lain (batugamping, *pozzolan*, abu terbang dan lain-lain).

Semen merupakan salah satu bahan perekat yang jika dicampur dengan air mampu mengikat bahan-bahan padat seperti pasir dan batu menjadi suatu kesatuan kompak. Sifat pengikatan semen ditentukan oleh susunan kimia yang dikandungnya. Adapun bahan utama yang dikandung semen adalah kapur (CaO), silikat (SiO₂), alumunia (Al₂O₃), ferro oksida (Fe₂O₃), magnesit (MgO), serta oksida lain dalam jumlah kecil (Rahadja, 1990).

a. Bahan Baku Semen

Bahan baku utama dalam pembuatan semen adalah batugamping dan tanah liat (>90%), sedangkan sisanya adalah pasirbesi dan pasirkuarsa.

1). Batugamping (*Limer Stone*)

Batugamping merupakan sumber utama senyawa kalsium. Batugamping murni umumnya merupakan kalsit atau aragonit yang secara kimia keduanya dinamakan CaCO₃.

Kalsium karbonat (CaCO_3) di alam sangat banyak terdapat di berbagai tempat. Kalsium karbonat berasal dari pembentukan geologis yang pada umumnya dapat dipakai untuk pembuatan semen portland sebagai sumber utama senyawa Ca. Senyawa karbonat dan magnesium dalam batugamping umumnya berupa dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Dalam proses pembuatan semen, CaCO_3 akan berubah menjadi oksida kalsium (CaO) dan dolomite berubah bentuk menjadi kristal oksida magnesium (MgO) bebas/*periclase*.

2). Tanah Liat (*Clay*)

Tanah Liat ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{K}_2\text{O} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) merupakan bahan baku semen yang mempunyai sumber utama senyawa silikat dan aluminat dan sedikit senyawa besi. Tanah liat memiliki berat molekul 796,40 g/gmol dan secara umum mempunyai warna cokelat kemerah-merahan serta tidak larut dalam air. Dalam jumlah amat kecil kadang-kadang juga didapati senyawa-senyawa alkali (Na dan K) yang dapat mempengaruhi mutu semen

3). Bahan Baku Penunjang

Bahan baku penunjang adalah bahan mentah yang dipakai hanya apabila terjadi kekurangan salah satu komponen pada pencampuran bahan mentah. Pada umumnya, bahan baku korektif yang digunakan mengandung oksida silika, oksida alumina dan oksida besi yang diperoleh dari pasir silika (*silica sand*) dan pasir besi (*iron sand*).

- **Pasir Silika (*silica sand*)**. Pasir silika digunakan sebagai pengkoreksi kadar SiO_2 dalam tanah liat yang rendah.
- **Pasir Besi (*iron sand*)**. Pasir besi digunakan sebagai pengkoreksi kadar Fe_2O_3 yang biasanya dalam bahan baku utama masih kurang.

4). Bahan Tambahan

- **Gypsum**. Di dalam proses penggilingan terak ditambahkan bahan tambahan gypsum sebanyak 4-5%. Gypsum dengan rumus kimia $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ merupakan bahan yang harus ditambahkan pada proses penggilingan klinker menjadi semen. Fungsi gypsum adalah mengatur waktu pengikatan daripada semen atau yang dikenal dengan sebutan *retarder*.
- **Abu Terbang (*Fly Ash*)**. Abu terbang adalah bagian dari sisa pembakaran batubara pada *boiler* pembangkit listrik tenaga uap yang berbentuk partikel halus *amorf* dan bersifat *pozzolan* yang dapat bereaksi dengan kapur pada suhu kamar dengan media air membentuk senyawa yang bersifat mengikat

b. Jenis-Jenis Semen

Menurut Standar Nasional Indonesia (SNI), semen dibagi menjadi beberapa jenis, yaitu sebagai berikut:

- 1) **Portland Cement**. Adalah jenis yang paling umum dari semen dalam penggunaan umum di seluruh dunia karena merupakan bahan dasar beton dan plesteran semen.

- 2) **Super Masonry Cement.** Semen ini lebih tepat digunakan untuk konstruksi perumahan gedung, jalan dan irigasi yang struktur betonnya maksimal K225. Dapat juga digunakan untuk bahan baku pembuatan genteng beton, *hollow brick*, *paving block*, tegel dan bahan bangunan lainnya.
- 3) **Oil Well Cemen (OWC).** Merupakan semen khusus yang lebih tepat digunakan untuk pembuatan sumur minyak bumi dan gas alam dengan konstruksi sumur minyak bawah permukaan laut dan bumi. Untuk saat ini jenis OWC yang telah diproduksi adalah *class G*, HSR (*High Sulfat Resistance*) disebut juga sebagai BASIC OWC. Bahan aditif dapat ditambahkan/dicampurkan hingga menghasilkan kombinasi produk OWC untuk pemakaian pada berbagai kedalaman dan temperatur.
- 4) **Semen Putih.** Digunakan untuk pekerjaan penyelesaian (*finishing*), sebagai *filler* atau pengisi. Semen jenis ini dibuat dari bahan utama kalsit limestone murni.
- 5) **Hidropobic cement.** *Hidrophobic cement* adalah klinker yang di giling dengan tambahan asam oleat atau asam streat.
- 6) **Waterproofed cement.** Semen yang digunakan di Inggris yang terbuat dari semen portland yang ditambahkan calsium, aluminium, atau serat logam lainnya.
- 7) **Semen alumina.** Semen alumina terbuat dari batugamping dicampur dengan bauksit dengan kadar campuran 60-70% (batugamping), dan 30-40% (bauksit). Campuran dibakar pada suhu 1600°C dalam tungku listrik sampai cair, kemudian hasil pembakaran tadi ditambahkan gips.
- 8) **Portland Pozzolan Cement.** Adalah semen hidrolis yang dibuat dengan menggiling klinker, gypsum dan bahan *pozzolan*. Produk ini lebih tepat digunakan untuk bangunan umum dan bangunan yang memerlukan ketahanan sulfat dan panas hidrasi sedang, seperti: jembatan, jalan raya, perumahan, dermaga, beton massa, bendungan, bangunan irigasi dan fondasi pelat penuh.
- 9) **Portland Composite Cement.** Digunakan untuk bangunan-bangunan pada umumnya, sama dengan penggunaan OPC dengan kuat tekan yang sama. PCC mempunyai panas hidrasi yang lebih rendah selama proses pendinginan dibandingkan dengan OPC, sehingga pengerjaannya akan lebih mudah dan menghasilkan permukaan beton/plester yang lebih rapat dan lebih halus.

Berdasarkan aplikasinya, *Portland Cement* dibagi menjadi beberapa tipe, yaitu sebagai berikut:

1. **Portland Cement Type I (Ordinary Portland Cement).** Semen portland tipe I merupakan jenis semen yang paling banyak dibutuhkan oleh masyarakat luas dan dapat digunakan untuk seluruh aplikasi yang tidak membutuhkan persyaratan khusus. *Ordinary Portland Cement* adalah semen portland yang dipakai untuk segala macam kontruksi apabila tidak diperlukan sifat-sifat khusus, misalnya ketahanan terhadap sulfat, panas hidrasi, dan sebagainya.
2. **Portland Cement Type II (Moderate Sulfat Resistance).** Semen Portland Tipe II merupakan semen dengan panas hidrasi sedang atau di bawah semen portland tipe I serta tahan terhadap sulfat. Semen ini cocok digunakan untuk daerah yang memiliki cuaca dengan suhu yang cukup tinggi serta pada struktur drainase. Semen Portland tipe II ini disarankan untuk dipakai pada bangunan seperti bendungan, dermaga dan landasan berat yang ditandai adanya kolom-kolom dan dimana proses hidrasi rendah juga merupakan pertimbangan utama.

3. **Portland Cement Type III (High Early Strength Portland Cement)**. Jenis ini memperoleh kekuatan besar dalam waktu singkat, sehingga dapat digunakan untuk perbaikan bangunan beton yang perlu segera digunakan atau yang acuannya perlu segera dilepas. Selain itu juga dapat dipergunakan pada daerah yang memiliki temperatur rendah, terutama pada daerah yang mempunyai musim dingin. Kegunaan pembuatan jalan beton, landasan lapangan udara, bangunan tingkat tinggi, bangunan dalam air yang tidak memerlukan ketahanan terhadap sulfat.
4. **Portland Cement Type IV (Low Heat Of Hydration)**. Tipe semen dengan panas hidrasi rendah. Semen tipe ini digunakan untuk keperluan konstruksi yang memerlukan jumlah dan kenaikan panas harus diminimalkan. Oleh karena itu semen jenis ini akan memperoleh tingkat kuat beton dengan lebih lambat ketimbang *portland* tipe I. Tipe semen seperti ini digunakan untuk struktur beton masif seperti dam dengan gravitasi besar dimana kenaikan temperatur akibat panas yang dihasilkan selama proses curing merupakan faktor kritis. Cocok digunakan untuk daerah yang bersuhu panas.
5. **Portland Cement Type V (Sulfat Resistance Cement)**. Semen *portland* yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat. Cocok digunakan untuk pembuatan beton pada daerah yang tanah dan airnya mempunyai kandungan garam sulfat tinggi. Sangat cocok untuk instalasi pengolahan limbah pabrik, konstruksi dalam air, jembatan, terowongan, pelabuhan, dan pembangkit tenaga nuklir

4.1.2.2. Proses Pembuatan Semen

Pada dasarnya proses atau teknologi pembuatan semen dibagi menjadi empat macam, yaitu:

a. Proses Basah

Pada proses basah, *raw material* dihancurkan kemudian digiling dalam *raw mill* diiringi penambahan air sehingga kadar airnya menjadi 25-40% dari total material. Selama penggilingan berlangsung, bahan baku yang telah berbentuk *slurry* dicampur hingga dicapai komposisi yang memenuhi syarat dalam pabrik. Setelah itu, *slurry* tersebut dimasukkan ke dalam *silo* untuk kemudian dibakar.

Adapun keuntungan dari proses basah adalah sebagai berikut

- Pencampuran dari komposisi *slurry* lebih mudah karena berupa luluhan.
- Kadar alkali tidak menimbulkan gangguan penyempitan dalam saluran
- Debu yang dihasilkan relatif sedikit.
- Deposit yang tidak homogen tidak berpengaruh karena mudah mencampur dan mengkoreksinya.

Sedangkan kerugian dari proses basah antara lain :

- Konsumsi bahan bakar lebih banyak.
- *Kiln* yang dipakai lebih panjang.
- Kapasitas rendah.
- Memerlukan air untuk proses dalam jumlah besar.

b. Proses Semi Basah

Di dalam proses semi basah, umpan dalam bentuk *cake*. Penyediaan umpan *kiln* sama dengan proses basah, hanya umpan *kiln* disaring terlebih dahulu. Selanjutnya *cake* yang digunakan sebagai umpan *kiln* disyaratkan memiliki kandungan air antara 17 % - 27 %.

c. Proses Semi Kering

Pada proses semi kering, umpan yang masuk dalam bentuk butiran. Bahan baku yang telah dihancurkan, digiling dalam *raw mill*. Selanjutnya dibentuk butiran-butiran dalam inti granulasi dan dicampur untuk mencapai homogenitas. Kadar air yang disyaratkan dalam umpan *kiln* sekitar 10-15%. Setelah homogen baru diumpankan ke *kiln*. Di dalam *kiln*, umpan dibakar hingga membentuk *clinker*. Setelah dingin, digiling ke *cement mill* bersama gypsum hingga terbentuk semen.

d. Proses Kering

Pada proses kering bahan baku dipecah dan digiling sampai kadar air maksimal 1%. Bahan baku yang telah digiling akan dicampur dalam *blending silo* untuk mendapatkan campuran yang homogen dengan menggunakan udara tekan. Tepung baku yang telah homogen ini diumpankan ke *kiln* selanjutnya didinginkan dan dicampur dengan gypsum dengan kadar gypsum sebanyak 4% untuk kemudian digiling dalam *finish mill* hingga menjadi semen.

Keuntungan dari proses kering adalah sebagai berikut :

- *Kiln* yang digunakan relatif pendek.
- Heat consumption rendah sehingga bahan bakar yang digunakan relatif lebih sedikit.
- Kapasitas produksi besar.
- Biaya operasi rendah.

Sedangkan kerugian dari proses kering adalah :

- Kadar air sangat mengganggu operasi karena material menjadi lengket.
- Campuran kurang homogen.
- Banyak debu yang dihasilkan, maka diperlukan alat penangkap debu.

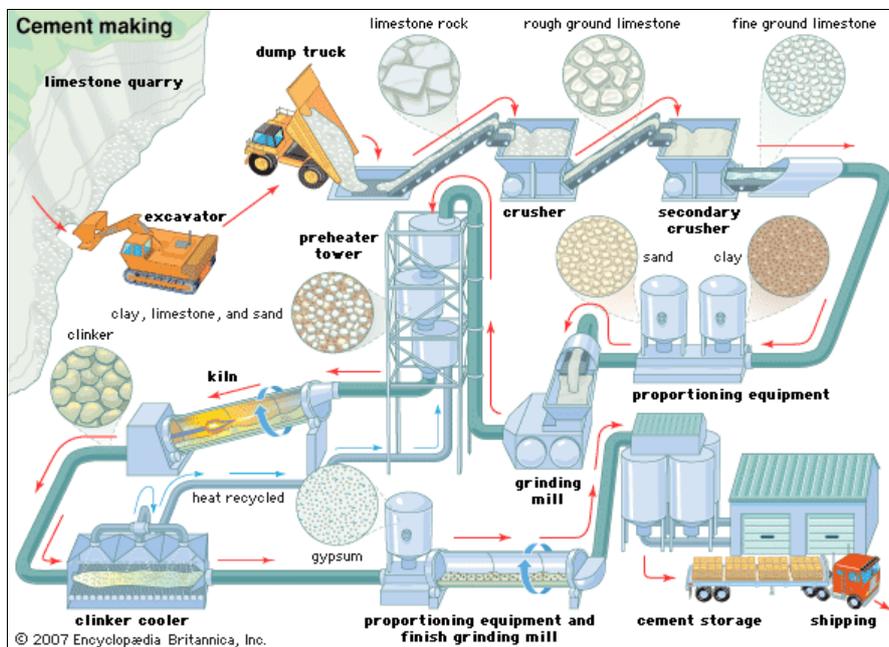
Proses kering merupakan proses yang paling banyak dipilih untuk diaplikasikan dalam proses produksi. Hal ini disebabkan karena proses tersebut mampu menghemat pemakaian bahan bakar dan pemakaian alat-alat produksi.

Pada prinsipnya, proses pembuatan semen terdiri dari lima tahap, yaitu sebagai berikut (Gambar 4.14):

1. **Penyediaan bahan baku.** Bahan baku utama yang digunakan untuk kegiatan produksi semen adalah batugamping sekitar 75 - 90 % dan tanah liat sekitar 7 - 20 %, sedangkan bahan baku koreksi berupa pasir besi sekitar 1 - 3 % dan pasir silika 1 - 6 %.
2. **Pengeringan dan penggilingan bahan baku.** Penggilingan bahan mentah adalah cara untuk memperkecil ukuran bahan mentah menjadi lebih kecil atau membuat luas permukaan material menjadi lebih besar. Tujuan dari penggilingan bahan

mentah ini adalah untuk mendapatkan campuran bahan mentah yang homogen dan untuk mempermudah terjadinya reaksi kimia pada saat klinkerisasi. Selain penggilingan, material juga mengalami pengeringan dengan media pengeringannya berupa gas panas yang dapat berasal dari *hot gas generator* ataupun dari *kiln exhaust gas*.

Pembentukan (pembakaran) klinker. Tepung bahan mentah (*raw meal*) yang telah dihomogenisasi di dalam CF Silo dikeluarkan dan dengan menggunakan serangkaian peralatan transport, tepung bahan mentah diumpankan ke *kiln*. Tepung bahan mentah yang diumpankan ke *kiln* disebut umpan baku atau umpan kiln (*kiln feed*). Proses pembakaran yang terjadi meliputi pemanasan awal umpan baku di *preheater* (pengeringan, dehidrasi dan dekomposisi), pembakaran di *kiln* (klinkerisasi) dan pendinginan di *Grate cooler* (*quenching*).



Gambar 4.14. Alur proses pembuatan semen (*Encyclopedia Britanica, Inc. 2007*)

3. **Penggilingan klinker.** Penggilingan dilakukan pada *roller press* sehingga memiliki ukuran tertentu yang selanjutnya digiling dengan menggunakan alat penggiling berupa *tube mill* yang berisi bola-bola besi sebagai media penghancurnya. Material yang telah halus dihisap dan dipisahkan dari udara pembawanya dengan menggunakan beberapa perangkat pemisah debu. Hasil penggilingan ini disimpan dalam semen silo yang kedap udara.
4. **Pengantongan (*packing*) semen.** Semen dikeluarkan dari semen silo dan diangkut dengan menggunakan *belt conveyor* masuk ke *steel silo*. Dengan alat pengantongan berupa *rotary packer*, semen dikantongi dengan setiap 1 sak berisi 50 kg semen, kemudian dibawa ke truk untuk dipasarkan.

4.1.2.3. Penggunaan Batubara untuk Pembuatan Klinker (*Raw Cement*)

Di Indonesia, hingga saat ini, penggunaan batubara untuk membuat klinker belum tergantikan, bahkan diprediksi akan terus meningkat hingga 2025 (Ridwan Djamiluddin,

Dirjen Minerba Kementerian ESDM, 25/01/2022). Konsumsi batu bara untuk industri semen pada 2021 sebesar 4,45 juta ton, dan diperkirakan akan meningkat menjadi 15 juta ton pada 2022. Kemudian pada 2023, kebutuhannya akan meningkat lagi menjadi 15,02 juta ton, dan pada 2024 hingga 2025 masing-masing akan meningkat menjadi 16,07 juta ton.

Proses pembakaran yang terjadi pada tanur *kiln* ini disebabkan karena adanya perpaduan antara bahan bakar batubara dengan udara atau oksigen yang betekanan tinggi dimana batubara yang digunakan adalah batubara yang telah dihaluskan hingga berbentuk seperti tepung yang dapat menghasilkan semburan api hingga suhu 1500°C .

Kiln memiliki dua lapisan yaitu lapisan luar dan lapisan dalam dimana pada lapisan luar dilapisi dengan baja st 400 sedangkan pada lapisan dalam menggunakan bata tahan api jenis CAST-15ES yang berfungsi sebagai isolasi untuk menahan panas yang terjadi pada saat proses pembakaran terjadi untuk menahan.

Panas yang dihasilkan didalam tungku kiln tidak serta merta berimbas keluar dikarena pada dinding kiln dilapisi oleh bata tahan api yang mampu menahan panas yang sangat tinggi hingga 1600 OC sehingga lingkungan yang disekitar kiln tidak terlalu panas pada saat kita berada disekitar area kiln. Di dalam proses pembakaran pada *kiln* dapat menggunakan bahan bakar *Industrial Diesel Oil (IDO)* atau batubara yang menjadi bahan bakar utama dalam proses pembakaran untuk membakar material yang ada di dalam *kiln*, sedangkan untuk *IDO* digunakan sebagai bahan bakar pemantik awal pada saat *kiln* hendak dinyalakan setelah *shut down*. Pada dasarnya mengapa batu bara yang digunakan sebagai bahan bakarnya karena biaya produksinya lebih murah sehingga dapat mengurangi biaya dibandingkan menggunakan bahan bakar *IDO*.

Pada saat material telah masuk ke *kiln*, terdapat empat zona proses pemanasan diantaranya calsinasi zone dimana pada proses ini material yang baru masuk kedalam *kiln*, material tersebut terkalsinasi dikarenakan mendapatkan panas yang lebih tinggi dari pada di dalam SP berkisar antara 1100-1200°C sehingga mengakibatkan perubahan bentuk pada material tersebut yang tadinya berupa serbuk-serbuk padat menjadi serbuk-serbuk yang mulai terlihat meleleh, kemudian ada lagi yang namanya transisi zone dimana pada proses ini bahan material mendapatkan pemanasan yang lebih tinggi berkisar antara 1200-1300 °C dimana pada proses ini material hampir mendekati cair dan yang terakhir terdapat proses *burning zone* dimana pada proses ini material benar-benar mendapatkan pemanasan secara penuh dari *kiln* hingga material tersebut mencair dan panasnya mencapai 1400–1600 °C kemudian proses yang terakhir adalah proses *cooling zone*, pada proses ini material yang telah masuk ke cooler mendapatkan pendinginan secara cepat atau proses pendinginan yang dikagetkan karena pada *cooler* ini panas pada material harus lebih dingin dibandingkan didalam *kiln* dimaksudkan supaya klinker tersebut tidak lengket pada *great plat* dan panas pada cooler mencapai 150- 200 °C. Panas yang dihasilkan didalam tungku *kiln* tidak serta merta berimbas keluar di karena pada dinding *kiln* dilapisi oleh bata tahan api yang mampu menahan panas yang sangat tinggi hingga 1600 °C sehingga lingkungan yang disekitar *kiln* tidak terlalu panas pada saat kita berada disekitar area *kiln*.

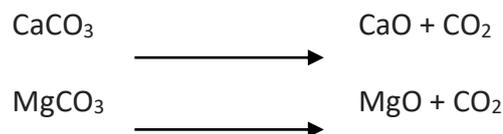
Material yang telah mengalami kalsinasi sebesar 80-90% masuk ke dalam *rotary kiln* secara perlahan-lahan untuk dilakukan pembakaran sehingga menyempurnakan reaksi kalsinasi dan pembentukan *clinker*. Pembakaran material di dalam *rotary kiln* sampai mencapar temperatur 1450°C. *Rotary kiln* merupakan silinder bundar dengan diameter 4,4 m dengan panjang 68 m. diletakkan pada bidang horizontal dengan kemiringan 5° dan kecepatan putaran maksimum 3 rpm. *Rotary kiln* dilapisi dengan batu tahan api (*fire brick*) yang ketebalannya 0,2 m dan berfungsi untuk menjaga ketahanan film shell dan mengurangi kehilangan panas selama terjadinya pembakaran.

Batu tahan api ini terdiri dari berbagai jenis yang letaknya tergantung pada temperatur, kondisi kimia, dan sifat – sifat fisik bahan yang melalui dinding bagian dalam *kiln*. Secara garis besar, proses pembakaran di dalam kiln terdiri dari tiga daerah zone, yaitu:

1. Daerah kalsinasi (*calcinacing zone* 820 – 900°C). Kalsinasi akan sempurna di dalam kiln dengan naiknya suhu sehingga dapat menguraikan CO₂.
2. Daerah pembentukan klinker (*Sintering Zone* 900 - 1400°C). Pada daerah ini terjadi pembentukan senyawa- senyawa: C₂S, C₃S, C₄AF dan C₃A.
3. Daerah pendinginan (*cooling zone* 1400-110°C). Daerah pendinginan terletak di ujung keluar material kiln. Di daerah ini material mengalami pendinginan karena bercampur dengan udara sekunder dari cooler yang masuk ke *kiln*.

Reaksi yang terjadi pada proses pembentukan *clinker* di dalam *rotary kiln* sebagai berikut:

1. Kalsinasi dari CaCO₃ dan MgCO₃ atau pelepasan *carbon dioxide* (CO₂) dari bahan baku yang terjadi pada temperatur 450 - 900°C



2. Pembentukan *dicalcium silicate* (C₂S) yang terjadi pada temperatur 900-1400°C



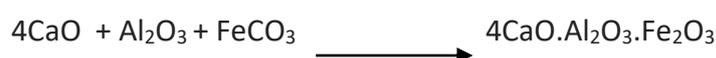
Reaksi berlangsung sampai SiO₂ habis

3. Pembentukan *tricalcium aluminat* (C₃A) dan *tetracalcium aluminat ferrite* (C₄AF) yang terjadi pada temperatur 1100 – 1338°C.

- Pembentukan C₃A

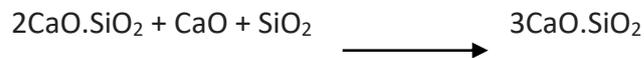


- Pembentukan C₄AF



4. Pembentukan *tricalcium silicate* (C_3S) dan pengurangan kadar *calciummonoksida* (CaO) bebas yang terjadi pada temperatur 1420 – 1450°C.

Reaksinya yaitu:



Bahan bakar yang digunakan untuk proses pembakaran dalam *kiln* dan *calciner* (*dual decarbonation Furnace* (DDF)) adalah batu bara (*coal*) dan minyak solar (*diesel oil*). Minyak solar digunakan pada saat pembakaran awal saja dan untuk selanjutnya digunakan bahan bakar batu bara, bahan bakar batu bara sebelum dimasukkan ke DDF dan *kiln* terlebih dahulu digiling di dalam *coal mill*.

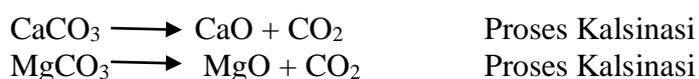
Kebutuhan oksigen untuk pembakaran minyak dan batu bara ini berasal dari *primary air fan* dan *cooling fan*, batu bara di giling di dalam *coal mill* sampai pada kehalusan tertentu. Batu bara ini dikeringkan dengan udara panas sisa pembakaran dari *kiln* yang dialirkan pada *preheater* dengan temperatur 400°C. pada aliran udara panas terdapat aliran udara masuk dan aliran udara keluar serta aliran udara *recycle*. Hal ini bertujuan menjaga temperatur udara panas yang masuk ke *coal mill*.

4.1.2.4. Pembentukan Klinker

Proses pembakaran untuk menghasilkan klinker diawali dengan menyiapkan bahan bakarnya terlebih dahulu baru kemudian melakukan pembakaran. Tujuan dari proses pembakaran ini ialah untuk menghasilkan klinker bermutu baik dengan pemakaian energi serendah mungkin dan operasi pembakaran berlangsung stabil dalam waktu yang lama. Salah satu faktor utama untuk mendapatkan hasil pembakaran yang baik ialah rancangan *kiln feed* (*raw mix design*) yaitu menentukan komposisi kimia dan ukuran partikel atau kehalusan dari *raw mix*. *Raw mix* dirancang untuk menghasilkan klinker bermutu baik (mempunyai senyawa alite C_3S , belite C_2S , aluminat C_3A , ferrite C_4AF dalam jumlah cukup dan mudah digiling). Proses pada tahap ini meliputi pemanasan awal umpan baku di *preheater* (pengeringan, dehidrasi dan dekomposisi), pembakaran di kiln (klinkerisasi) dan pendinginan di *grate cooler* (*quenching*). Selanjutnya klinker yang dihasilkan disimpan di *clinker silo*. Beberapa reaksi kimia yang berlangsung dalam proses pembuatan klinker yaitu:

- 1). Proses Pemanasan Awal

Proses pemanasan awal adalah proses penguapan air dan proses Kalsinasi pada umpan *kiln* (*raw meal*) pada suhu 600-800 °C.



Proses ini terjadi dalam peralatan *preheater*.

- 2). Proses Klinkerisasi

Proses klinkerisasi dalam pembuatan semen adalah proses pengikatan antara oksida-oksida yang terkandung dalam material untuk membentuk senyawa C3S, C2S, C3A, dan C4AF. Reaksi pembentukan senyawa-senyawa tersebut berlangsung di dalam kiln pada suhu 900-1450°C.

4.1.2.5. Rotary Kiln

Di dalam proses pembuatan klinker semen, *kiln* ini sangat terkenal. Bentuknya seperti tabung panjang (Gambar 4.15) dan selama proses kalsinasi atau pembuatan klinker akan terus berputar, sehingga dikenal pula dengan nama lain *rotary kiln* atau tanur putar.



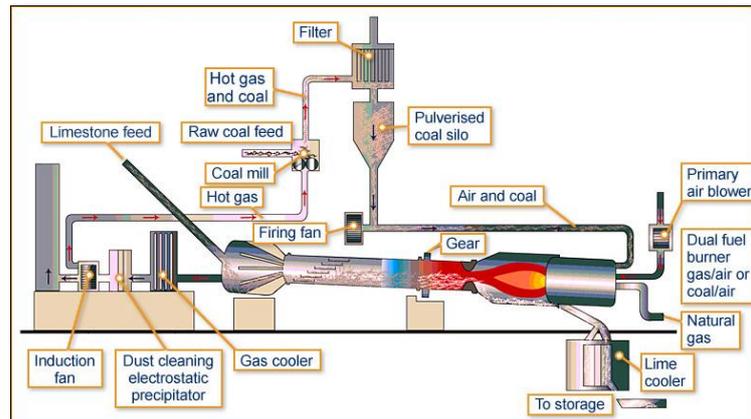
Sumber: <https://id.bossgoo.com/product-detail/competitive-waste-incineration-rotary-kiln-57325483.html>

Gambar 4.15. *Rotary kiln* pada suatu pabrik semen

Rotary kiln atau tanur putar adalah sebuah perangkat *pyroprocessing* yang digunakan untuk menaikkan material sampai pada suhu tinggi (kalsinasi) dalam suatu proses berkelanjutan. Material yang biasanya diproduksi menggunakan *rotary kiln* meliputi : semen, kapur, refraktori, metakaolin, titanium dioksida, alumina, *vermiculite*, bijih besi. *Rotary kiln* biasanya digunakan dalam proses metalurgi dalam hal kalsinasi berbagai macam material dengan menerapkan panas sampai suhu sampai 1000 °C secara terus menerus.

Rotary kiln merupakan suatu reaktor berbentuk silinder panjang, berputar, dipasang dengan sudut kemiringan tertentu (Gambar 4.16). Umpan berupa padatan dimasukkan dari ujung atas dan keluar dari bawah setelah mengalami proses pada temperatur tinggi dengan bantuan gas panas hasil reaksi pembakaran.

Karena *kiln* berputar, maka material secara bertahap bergerak menuju ujung bawah, dan tentunya akan mengalami sejumlah pengadukan dan pencampuran. Gas panas melewati sepanjang *kiln*, kadang-kadang dalam arah yang searah dengan material yang diproses (*co-current*), tetapi biasanya dalam arah yang berlawanan (*counter-current*). Gas panas dapat dihasilkan dalam tungku eksternal, atau dapat dihasilkan oleh api di dalam tungku. Api yang dihasilkan dari *burner-pipe* (atau *firing pipe*) berperan seperti *Bunsen-burner* yang besar. Bahan bakar untuk pembakaran ini bisa berasal dari gas, minyak atau batu bara bubuk, yang paling banyak dipakai adalah batu bara bubuk.



Sumber: <https://id.bossgoo.com/product-detail/competitive-waste-incineration-rotary-kiln-57325483.html>

Gambar 4.16. Skema *Rotary Kiln*

4.2. PENGEMBANGAN PEMANFAATAN BATUBARA

Hingga saat ini, pengembangan pemanfaatan batubara masih terus dikembangkan. Sudah banyak kemajuan yang dicapai dalam rangka hilirisasi pemanfaatan batubara tersebut, namun keterbatasan teknologi dan pendanaan maupun persaingan dari produk sejenis yang berasal dari bahan lain masih menjadi tantangan tersendiri.

4.2.1. Batubara untuk Memproduksi Metanol

Melalui proses gasifikasi, batubara dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan metanol. Metanol merupakan produk petrokimia yang memegang peranan sangat penting bagi pengembangan produk hilirnya. Bahan baku metanol sangat dibutuhkan dalam industri tekstil, plastik, resin sintesis, farmasi, insektisida, dan *plywood*. Metanol juga berperan sebagai *antifreeze* dan *inhibitor* dalam kegiatan hilir minyak dan gas. Metanol juga merupakan salah satu bahan baku untuk pembuatan *biodiesel*. Selain itu, metanol juga dapat diolah lebih lanjut menjadi *Dimetil Eter* (DME) yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif sebagai campuran bahan bakar lain atau pun sebagai DME murni.

Produksi metanol dari batubara terdiri atas tiga tahapan. Tahap pertama dimulai dari proses gasifikasi batubara yang menghasilkan *syngas*. Pada tahap kedua *syngas* diolah dalam unit *methanol synthesis* untuk menghasilkan *crude methanol*. Selanjutnya pada tahap ketiga *crude methanol* dimurnikan menggunakan unit *methanol purification* dan menghasilkan produk akhir metanol.

Hingga saat ini ada beberapa teknologi utama yang dapat digunakan untuk menghasilkan metanol dari *syngas*. Teknologi pembuatan metanol yang berkembang saat ini adalah reaksi katalitik fasa gas pada tekanan rendah untuk menghambat pembentukan produk samping sehingga menghasilkan selektivitas tinggi (di atas 99%). Untuk meningkatkan perolehan produk metanol secara keseluruhan dilakukan dengan mengembalikan reaktan yang tidak bereaksi sebagai umpan reaktor (*recycle*).

4.2.2. Pembuatan DME dari Batubara

Dimetil Ether (DME) merupakan senyawa eter yang paling sederhana, berbentuk gas tidak berwarna; berbau khas eter; larut dalam air maupun dalam minyak; tidak bersifat

karsinogenik, teratogenik, mutagenik; dan tidak beracun. DME mempunyai formula $\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$ atau rumus empiris $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$.

Pemanfaatan DME sebagai bahan bakar akan menghasilkan dampak lingkungan rendah. Pembakarannya tidak menghasilkan oksida belerang (SOX) dan asap. DME juga menghasilkan NOX dan CO yang sangat rendah. Sifat DME yang tidak beracun, mudah dicairkan, dan mudah ditangani membuatnya ideal untuk dimanfaatkan sebagai bahan bakar sektor rumah tangga. Selain itu DME juga dapat dimanfaatkan pada sektor industri baik sebagai substitusi LPG dan minyak tanah, bahan bakar transportasi (kendaraan diesel, *fuel cell*), bahan bakar pembangkit listrik (pembangkit termal kogenerasi dan *fuel cell*), bahan baku untuk produk kimia, maupun sebagai pelarut.

Sebagai bahan substitusi LPG, DME pada dasarnya mempunyai sifat yang tidak terlalu berbeda dengan LPG. Pemanfaatan DME sebagai substitusi LPG diperkirakan tidak akan mengubah spesifikasi teknik tabung LPG selain mengganti karet penyekat (*seal*) dengan bahan yang cocok dengan sifat fisik DME.

Berdasarkan hasil penelitian di beberapa negara, pemanfaatan DME untuk sektor rumah tangga dapat dilakukan melalui pencampuran DME dan LPG dengan perbandingan volume 20% DME dan 80% LPG. Campuran 20% DME pada LPG tidak memerlukan perubahan apapun pada tabung dan perlengkapan LPG lainnya.

Secara umum, terdapat dua teknologi proses produksi DME yang telah dikembangkan hingga saat ini, yaitu:

1. Proses tidak langsung (*indirect process*). Pada proses ini, DME dihasilkan melalui dua tahap proses yaitu sintesis metanol dari *syngas* dan proses sintesis DME dari metanol. Produksi DME dengan proses tidak langsung paling banyak digunakan saat ini dan telah mencapai skala/kapasitas kilang di atas 1 juta ton/tahun.

2. Proses langsung (*direct process*). Pada prinsipnya proses langsung memiliki reaksi yang sama dengan proses tidak langsung, hanya saja tahapan prosesnya dilakukan dalam satu reaktor. Katalis yang digunakan adalah katalis kombinasi. Proses sintesis DME dilakukan pada tekanan di atas 30 atm dan temperatur di atas 150°C. Produksi DME dengan proses langsung sampai saat ini umumnya masih dalam tahap pengembangan dalam skala *pilot plant* (Tabel 4.1).

Tabel 4.1. Spesifikasi DME Dibandingkan dengan Bahan Bakar Jenis Lain

Karakteristik	DME	Diesel	Metana	Metanol	LPG
Boiling point (°C)	-25	180-370	-162	65	-42
Liquid density (kg/m ³)	0,66	0,84	0,42	0,78	0,49
Viscosity, 40°C (cP)	0,18	2,3-3,3	-	-	0,1
Cetane number	55-60	40-55	-	5	5
Auto ignition temp (°C)	23,5	250	650	450	470
Lower heating value (MJ/kg)	28,8	42,5	49,9	-	46

Sumber: Road Map Pengembangan dan Pemanfaatan Batubara 2021 – 2045, <https://www.esdm.go.id>

Berdasarkan Tabel 4.1 dapat diketahui bahwa DME memiliki karakteristik yang mirip dengan LPG namun memiliki nilai *heating value* yang lebih rendah daripada LPG, diesel, metana, dan metanol. Jika dilihat dari nilai *cetane number*, DME lebih unggul dibandingkan dengan diesel sehingga memiliki *ignitibility* yang lebih unggul pada *compression ignition engines*

4.2.3. Batubara untuk Menghasilkan *Syntetic Natural Gas* (SNG)

Syntetic Natural Gas (SNG) merupakan campuran gas hidrokarbon dengan sifat mirip seperti gas alam yang dapat diproduksi dari gasifikasi batubara atau biomassa. SNG dapat menggantikan fungsi gas alam, seperti gas kota untuk kebutuhan rumah tangga, bahan bakar pembangkit listrik tenaga gas/uap, bahan bakar industri, dan bahan bakar kendaraan bermotor (BBG/NGV).

Secara umum teknologi gasifikasi batubara untuk menghasilkan *syntetic natural gas* (SNG) melalui 3 tahapan, yaitu tahap metanasi, pemurnian SNG, dan *compression*. Sebelum melakukan tahapan metanisasi diperlukan *pretreatment* untuk memenuhi persyaratan tahapan berikutnya yaitu *water gasshift*, penghilangan merkuri, dan penghilangan gas asam.

Syngas hasil gasifikasi terdiri atas komponen utama berupa gas H₂ dan CO. Pemanfaatan *syngas* langsung memiliki kendala karena *energy density* yang rendah, korosif, beracun, dan kendala teknis dalam pendistribusian. Untuk mengatasi hal ini, *syngas* dikonversi menjadi gas metana (CH₄) dengan proses metanasi melalui reaksi hidrogenasi gas karbon monoksida (CO) dan gas karbon dioksida (CO₂).

Produk reaksi metanasi berupa gas metana (CH₄) yang memiliki komposisi mirip dengan gas alam sehingga sering disebut sebagai *syntetic natural gas* (*syngas*).

Produk gasifier harus dikonversi untuk memenuhi persyaratan proses metanasi SNG. Proses metanasi membutuhkan rasio H₂ terhadap CO sebesar 3:1 agar layak diproduksi secara teknis dan ekonomi.

Proses *Water Gas Shift* (WGS) mengkonversi karbon monoksida menjadi hidrogen dan CO sehingga konsentrasi hidrogennya meningkat dengan mereaksikan CO dengan air di atas *bed katalis*

Unit WGS biasanya terdiri atas 2 unit untuk memaksimalkan produksi hidrogen yang dibutuhkan untuk sintesis amonia dan mengurangi jumlah COS (*carbonyl sulfide*) yang masuk ke dalam sistem *acid gas removal* (AGR).

Fasilitas gasifikasi berpotensi menghilangkan merkuri dengan cara yang lebih sederhana dan efektif secara biaya daripada pabrik *pulverized coal* (PC) konvensional. Hal ini terjadi karena merkuri dapat dihilangkan dari *syngas* pada tekanan tinggi dan sebelum sintesis produk sehingga volume *syngas* jauh lebih sedikit dari volume *flue gas* jika dibandingkan dengan PC. Merkuri dihilangkan dengan adsorpsi *bed* karbon. Gas mentah mendapat perlakuan sebelum masuk ke dalam sistem AGR. Gas tersebut harus didinginkan hingga

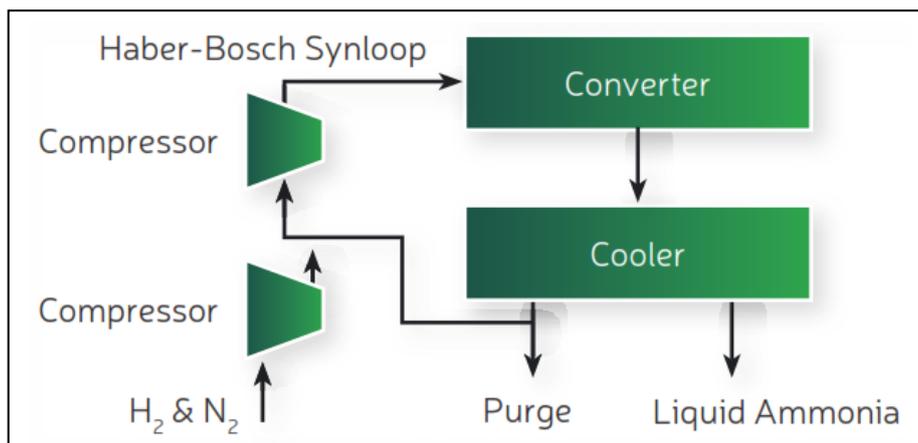
temperatur 35°C (95°F). Selama pendinginan melalui rangkaian penukar panas, sebagian besar uap air mengembun (terkondensasi).

Gasifikasi batubara untuk memproduksi produk kimia akan menghasilkan *syngas* yang harus mendapat perlakuan sebelum pemanfaatan lebih lanjut. Perlakuan itu adalah AGR dan pemulihan (perolehan) sulfur. Pada Pabrik di Amerika Serikat, AGR ini adalah unit selexol yang memiliki 2 tahap proses; pertama untuk menghilangkan H₂S dan kedua untuk mengurangi kadar CO melalui absorpsi. Untuk melindungi katalis metanasi, kadar S dalam *syngas* harus di bawah 1 ppm untuk mencapai umur katalis yang lama.

Proses dalam selexol menghasilkan tiga aliran produk. *Syngas* berkadar H₂ tinggi disatukan dengan gas pencuci (*purge gas*) dari *loop* sintesis amonia dan dikirim ke proses *Pressure Swing Absorption* (PSA). Aliran yang kaya CO₂ disatukan dengan aliran kaya CO₂ dari rangkaian produksi SNG kemudian dibuang ke atmosfer untuk kasus *non sequestration* atau dikompres untuk pembuatan (sekuestrasi) dalam kasus *carbon sequestration*. Sebagian aliran produk CO diambil dan dikompres hingga tekanan 5,62 MPa (815 psia) untuk menghasilkan fluida pada pemindahan batubara. Aliran gas asam disatukan dengan lawan dari tahap produksi SNG dan diumpan ke pabrik Claus. Dalam kedua kasus tersebut, gas asam mengandung hampir 40% H₂S dan 50% CO₂ dengan neraca utamanya adalah H₂ dan CO

4.2.4. Batubara untuk Menghasilkan Amonia

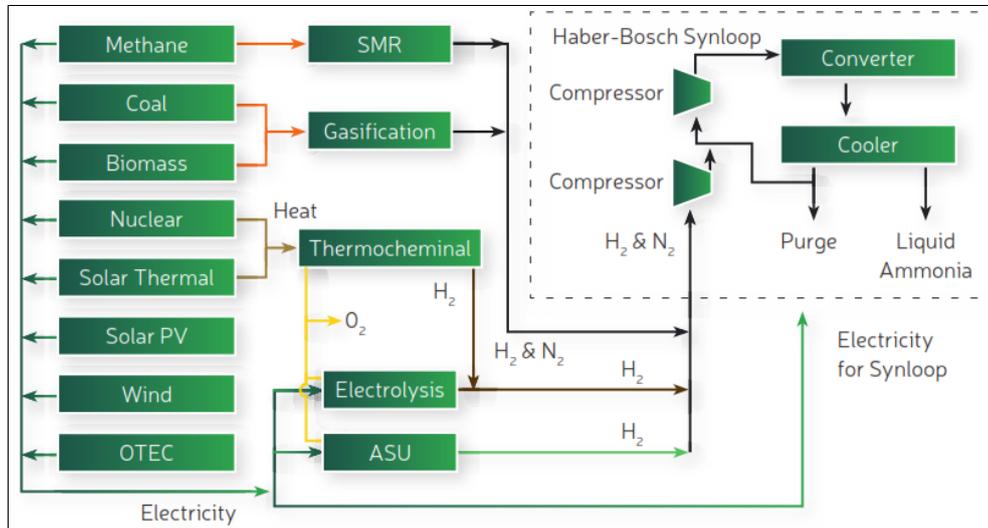
Gasifikasi batubara digunakan untuk menghasilkan gas sintetis (*syngas*) sebagai input pada proses *Haber-Bosch* (Gambar 4.17) (Rossetti, 2005). Proses gasifikasi ini melibatkan reaksi eksotermik batubara dengan campuran oksigen dan uap untuk menghasilkan gas sintetis, terutama terdiri dari karbon monoksida dan hidrogen (Weinheim, 1999).



Gambar 4.17. Diagram Alir *Haber-Bosch Synthesis Loop*

Sejumlah besar kandungan air, karbon dioksida, dan metana terdapat pada gas sintetis. Gas sintetis diproses dengan menggunakan reaksi *methane-steam reaction* dan *CO shift reaction* untuk merubah karbon monoksida dan metana menjadi hidrogen. Gas juga melewati beberapa *treatment* untuk menghilangkan karbon dioksida dan substansi lain, seperti partikulat, senyawa sulfur dan nitrogen (Stiegel G & Massood R, 2006 dalam *Road Map Pengembangan dan Pemanfaatan Batubara 2021 – 2045*).

Campuran hidrogen dan nitrogen kemudian diumpungkan ke *sinloop Haber-Bosch* untuk produksi amonia. Amonia dapat diproduksi dari berbagai sumber energi (*energy resources*). Gambar 4.18 menunjukkan diagram metode produksi ammonia.



Gambar 4.18. Diagram Metode Produksi Ammonia dari Beberapa Sumber Energi

4.2.5. Batubara untuk Menghasilkan Hidrogen (H₂)

Penggunaan batubara sebagai sumber bahan bakar fosil bukan berarti tanpa masalah karena melepaskan karbon dioksida dan polutan lainnya saat dibakar. Gasifikasi batubara dan penyerapan karbon menjadialah satu solusi untuk dapat meminimalkan polutan dan gas rumah kaca.

4.2.6. Batubara untuk Menghasilkan Bahan Bakar Melalui Pencairan Batubara (*Coal Liquefaction*)

Pencairan batubara adalah proses mengkonversi batubara menjadi hidrokarbon cair baik berupa bahan bakar minyak maupun bahan petrokimia. Namun, umumnya produk utama yang dikehendaki dari pencairan batubara adalah berupa bahan bakar minyak sehingga terkenal istilah *Coal to Liquid Fuels* atau CTL.

Secara umum teknologi pencairan batubara terbagi atas tiga kategori: pirolisis, pencairan langsung (*DirectCoal Liquefaction/DCL*), dan pencairan tidak langsung (*Indirect Coal Liquefaction/ICL*).

1). Pirolisis

Pencairan batubara melalui pirolisis dilakukan melalui pemanasan batubara tanpa kehadiran udara pada suhu 400°C dan menghasilkan gas, cairan hidrokarbon, dan arang (*char*). Pirolisis batubara disebut juga dengan proses destilasi destruktif. Proses ini melibatkan pemutusan ikatan karbon dalam struktur makromolekul batubara. Reaksi pemutusan ikatan karbon menyebabkan penurunan berat molekul dalam hidrokarbon batubara sehingga mengubah batubara yang padat menjadi cairan atau gas.

Teknologi pencairan batubara dengan proses pirolisis telah banyak tersedia secara komersial. Tabel 4.2 memperlihatkan daftar berbagai teknologi pirolisis batubara pada kondisi operasi proses tertentu dan produk pirolisisnya. Dalam teknologi pirolisis ada beberapa faktor yang mempengaruhi efisiensi proses dan hasil produk, antara lain peringkat batubara, ukuran partikel batubara, jenis reaktor, mekanisme proses, tekanan parsial hidrogen, tekanan reaktor, suhu pemrosesan, dan waktu tinggal batubara.

Tabel 4.2. Ringkasan Perbandingan Pencairan Batubara dengan Teknologi Pirolisis

Proses	Pengembang	Tipe Reaktor	Suhu Reaksi (°C)	Tekanan Reaksi (psi)	Waktu Tinggal Batubara	Yield (%)		
						Char	Minyak	Gas
Lurgi–Ruhrgas	Lurgi–Ruhrgas	Mechanical mixer	450–600	15	20 detik	45–55	15–25	30
COED	FMC Corp.	Multiple fluidized bed	290–815	20–25	1– 4 jam	60,7	20,1	15,1
Occidental coal pyrolysis	Occidental	Entrained flow	580	15	2 detik	56,7	35,0	6,6
TOSCOAL	Tosco	Kiln-type retort vessel	425–540	15	5 menit	80–90	5–10	5–10
Clean coke	U.S. Steel Corp.	Fluidized bed	650–750	100–150	50 menit	66,4	13,9	14,6
Union Carbide process	Union Carbide	Fluidized bed	565	1000	5 - 11 menit	38,4	29,0	16,2

Sumber: Road Map Pengembangan dan Pemanfaatan Batubara 2021 – 2045, <https://www.esdm.go.id>

2). Direct Coal Liquefaction (DCL)

Proses DCL sering disebut juga dengan proses hidrogenasi karena dalam prosesnya memerlukan kehadiran gas hidrogen. Teknologi DCL melibatkan kontak batubara secara langsung dengan katalis pada suhu dan tekanan tinggi dengan tambahan gas hydrogen (H_2). Proses ini biasanya memerlukan pelarut untuk membentuk produk cairan mentah yang selanjutnya dimurnikan menjadi produk bahan bakar cair.

Proses DCL memiliki sejarah yang relatif panjang dan berbagai teknologi telah berhasil dioperasikan sepenuhnya dalam skala besar. Operasi pencairan batubara dalam skala besar tersebut telah memberikan kontribusi sangat besar bagi kemajuan industri proses pencairan batubara dari aspek permesinan, desain, dan pengetahuan. Proses teknologi DCL yang telah komersial termasuk H-Coal, *Solvent Refined Coal I* (SRC-I), SRC-II, *Exxon Donor Solvent* (EDS), *Integrated Two-Stage Liquefaction* (ITSL), CC-ITSL, dan *Catalytic Two-Stage Liquefaction* (CTSL).

3). Indirect Coal Liquefaction (ICL)

Berbeda dengan DCL yang mengkonversi batubara secara langsung menjadi hidrokarbon cair, ICL memerlukan dua tahap untuk mencairkan batubara. Pada tahap pertama proses ICL batubara mengalami proses gasifikasi batubara yang menghasilkan campuran gas CO dan H_2 yang terkenal sebagai syngas. Kemudian dengan menggunakan proses *Fischer–Tropsch*, syngas dikonversi menjadi cairan hidrokarbon.

3.2.7. Briket Batubara-Biomassa (*Bio-coal*) untuk *Co-firing* PLTU dan Briket Batubara Terkarbonisasi untuk Industri Kecil/UMKM

Briket adalah bahan bakar padat yang dibentuk melalui penekanan atau pencetakan sehingga memiliki ukuran yang seragam sesuai dengan kebutuhan. Briket batubara adalah batubara yang telah dicetak sehingga ukuran butirnya seragam.

Berdasarkan bahan baku, briket batubara dapat dikategorikan menjadi 3 jenis, yaitu:

- Briket batubara non karbonisasi;
- Briket batubara terkarbonisasi; dan
- Briket *bio-coal*

Briket batubara non karbonisasi adalah briket batubara yang dibuat langsung tanpa proses karbonisasi terlebih dahulu. Pembuatan briket ini sangat sederhana karena hanya terdiri dari penggerusan, pencampuran bahan pengikat, dan pencetakan. Sedangkan pada briket batubara terkarbonisasi, bahan baku yang digunakan berupa batubara yang telah dikarbonisasi atau dirangkan terlebih dahulu. Tujuan karbonisasi adalah untuk mengurangi kadar zat terbang sehingga saat pembakaran tidak menimbulkan asap.

Briket *bio-coal* merupakan briket non karbonisasi tetapi bahan bakunya berupa campuran batubara dan biomassa. Umumnya briket ini tanpa bahan pengikat dengan tekanan pembriketannya cukup tinggi yaitu sekitar 3 ton/cm².

Potensi pasar briket batubara terkarbonisasi untuk industri kecil/UMKM yang padat energi dalam operasionalnya. Potensi pasar tersebut terlihat dari hasil survei pada 2001 dan 2002 untuk Jawa dan Bali yang menunjukkan kebutuhan akan briket batubara relatif besar (Tabel 4.3). Survei dilakukan di daerah Jawa dan Bali dengan pertimbangan sentra UMKM dominan pada daerah tersebut. Potensi pasar briket batubarabiomassa (*bio-coal*) untuk *cofiring* PLTU juga masih terbuka luas karena penggunaan PLTU berbahan bakar batubara masih akan tetap dipertahankan dalam jangka panjang seiring dengan pemanfaatan *cleancoaltechnology* (CCT).

Secara umum, pembuatan briket batubara dapat dibagi menjadi beberapa tahap meliputi penggerusan batubara, pencampuran bahan pengikat, pencetakan, dan pengeringan.

Tabel 4.3. Konsumsi Penggunaan Briket Batubara di Jawa & Bali

Pengguna	Kuantitas potensi penggunaan, ton					
	Jawa Barat	Jawa Tengah	Jawa Timur	Yogyakarta	Bali	Total
Tahu/Tempe	111.660	84.500	96.400	8.150	8.070	308.780
Pengeringan gabah	207.053	166.575	170.677	12.944	15.824	573.073
Peternakan ayam	53.244	53.244	53.244	10.649	10.649	181.030
Pondok pesantren	11.813	4.271	9.040	788	91	26.033
Jamu	87.600	87.600	525.600	-	-	700.800
Lain-Lain*)	2.520	1.992	2.400	120	100	7.132
Total	473.800	398.182	857.361	32.651	37.734	1.976.818

*) Industri mie, petis, roti, pengeringan tembakau, pengolahan kulit, rumah makan
 Sumber: Departemen Koperasi & Pengusaha Kecil Menengah, 2002.

1). Briket Batubara-Biomassa (*Bio-coal*)

Bio-coal adalah briket batubara dengan bahan baku berupa campuran batubara serbuk dengan serbuk biomassa. Pengembangan produksi briket *bio-coal* telah mencapai skala

operasi *demo plant* dengan kapasitas 5 ton per jam. *Demo plant* pabrik briket *bio-coal* berada di Sentra Teknologi Pemanfaatan Batubara di Palimanan, Kabupaten Cirebon. Mesin briket *biocoal* tersebut telah dioperasikan dengan campuran bahan baku beberapa variasi antara lain batubara-bagas, batubara-serbuk gergaji, batubara sekam padi, dan batubara-tandan sawit.

2). Briket batubara terkarbonisasi

Briket batubara terkarbonisasi merupakan briket batubara tanpa asap, karena kadar zat terbang pada batubara telah dikurangi sampai sekitar 15% (*air dried basis* atau adb) melalui proses karbonisasi suhu rendah. Salah satu produsen briket terkarbonisasi adalah PT Bukit Asam di Tanjung Enim, berkapasitas 10.000 ton per tahun.

3). Briket batubara non karbonisasi

Pembuatan briket batubara non karbonisasi adalah dengan menambahkan bahan pengikat berupa tepung tapioka, serbuk tanah liat, atau molase berukuran 60 mesh pada batubara berukuran 3 mm. Jumlah bahan pengikat yang optimal adalah:

- Bila menggunakan tepung tapioka sekitar 3% berat batubara;
- Bila menggunakan serbuk tanah liat sekitar 10% berat batubara;
- Bila menggunakan molase sekitar 8% berat batubara.

4.2.8. Batubara untuk Industri Metalurgi

Secara umum kokas, briket kokas, *carbon raiser*, dan *pulverized coal injection* adalah padatan hasil karbonisasi batubara atau material kaya karbon lainnya. Karbonisasi sendiri adalah proses pemanasan batubara dengan kondisi oksigen terbatas sehingga menyisakan karbon padat dan abu. Produk karbonisasi akan berupa kokas jika operasi pemanasan berlangsung pada temperatur tinggi dan semi kokas pada temperatur lebih rendah (400-700 °C). Semi kokas dengan *properties* tertentu dapat digunakan sebagai *carbon raiser* maupun reduktor pada pengolahan dan pemurnian mineral logam seperti nikel.

Kokas dan semi kokas digunakan dalam industri pemurnian nikel dan besi. Berdasarkan data dari pengguna kokas, kebutuhan kokas untuk *blast furnace* mencapai 4 juta ton. Sedangkan kebutuhan batubara semi kokas untuk produksi ferro nikel melalui *rotary kiln electric furnace* sekitar 10 juta ton. Permintaan semi kokas untuk briket batubara terkarbonisasi (*smokeless fuel*) diperkirakan juga cukup tinggi sekitar 500.000 ton per tahun dengan asumsi 25% dari kebutuhan briket batubara.

4.2.8.1. Proses dan Teknologi Kokas Metalurgi

Proses pembuatan kokas metalurgi dapat dilakukan dengan bahan baku berupa *coking coal* yang dicampur dengan beberapa jenis batubara *non coking coal* atau *coking coal non premium*. Sebagai ilustrasi, spesifikasi batubara sebagai bahan *blending* di PT Krakatau Steel dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Di Indonesia, produsen kokas metalurgi didominasi oleh 3 pabrik yaitu PT Krakatau Steel, PT Krakatau Posco, dan PT Indocoke yang seluruhnya berlokasi di Cilegon.

Pemenuhan batubara untuk kebutuhan kokas metalurgi sebagian besar masih mengandalkan impor batubara dari Australia. Penggunaan batubara lokal sebagai umpan *blending* bahan baku kokas metalurgi hanya mencapai 20%. Batubara lokal tersebut antara lain berasal dari Asmin Koalindo Tuhup (AKT), Adaro Indonesia, Marunda Graha Mineral (MGM), dan Suprabari Mapindo Mineral (SMM).

4.2.8.2. Teknologi *Carbon Riser*

Carbon riser adalah produk yang dihasilkan dari proses karbonisasi pada suhu tinggi (*high temperature carbonization*, >900°C). Seperti halnya semi kokas dan kokas, *carbon riser* merupakan produk yang banyak digunakan pada industri peleburan besi, baja dan pengecoran, berfungsi sebagai aditif dan bahan bakar. Selain itu, salah satu produk *carbon riser* lainnya adalah karbon aktif yang dapat digunakan di berbagai proses produksi, antara lain sebagai media penangkap emas pada proses pengolahan bijih emas. Perbedaan dengan semi kokas dan kokas, *carbon riser* memiliki fungsi utama sebagai peningkat karbon pada proses produk akhir, seperti pembuatan baja karbon, baja *alloy* yang merupakan paduan logam besi dengan unsur-unsur lainnya seperti karbon, krom, nikel, mangan, fosfor dan sebagainya, dan *high speed steel* yang memiliki kandungan karbon sekitar 0,7-1,5%.

Tabel 4.4. Spesifikasi Batubara Indonesia dan Australia di PT Krakatau Steel

SPEKIFIKASI	SARAJI	MORANBAH NORTH	GERMAN CREEK #8	GOONYELLA	LAKE LINDSAY	AKT	ADARO	MGM	SMM	
Total moisture	%	10	10	10.30	10	10.30	9	9	9	9.2
Ash	%	10.5	8.5	9.10	8.90	9.5	9	5.6	4.8	7.9
Volatile Matter	%	18.60	23.30	20.20	23.20	17.20	26.5	39	38	34.80
Fixed Carbon	%		66.70	69.20	66.90	71.90	64.00	52.00	54.90	55.40
Total Sulfur	%	0.60	0.50	0.52	0.52	0.49	0.95	0.89	0.30	0.74
Phosphorous	%	0.036	0.04	0.05	0.03	0.06	0.02	0.01	0.02	
CSN		9.00	9.00	9.00	8.50	8.00	9.00	5.00	7.00	8.5
Caking index-G			90	86		70	91	80		
Sapoznikov-Y			18	15		8	25	10		
Long Max Fluidity (LMF)		2.3	3.18	2.54	3	1.3	2.65	2	2.71	4.46
M10	%	85	83	84	80	73	55.5			
M40	%	6	8	7	6	8	9.2			
CSR	%	71	68	70	68	58	60		38	45
CRI	%		22	21	22	27	26.4		46,2	31.7
Vitrinite Reflectance (Rv Max)	%	1.52	1.18	1.44	1.2	1.63	1.27	0.74	0.76	0.79
AUSTRALIA						INDONESIA (KALIMANTAN)				

Sumber: PT Krakatau Steel (2017) dalam Road Map Pengembangan dan Pemanfaatan Batubara 2021 – 2045, <https://www.esdm.go.id>

4.2.9. Upgrading Batubara

Batubara peringkat rendah seperti lignit dan sub-bituminous pada umumnya memiliki nilai kalori rendah (< 5.100 kal/g dasar kering udara atau *air dried basis, adb*) serta kadar

air cukup tinggi (30%-50%). Akibat tingginya kadar air maka nilai kalori batubara tersebut menjadi rendah sehingga kurang diminati dan sulit untuk dipasarkan. Padahal sumber daya batubara jenis ini jumlahnya cukup banyak di Indonesia. Selain itu, batubara peringkat rendah juga memiliki kecenderungan untuk mengalami swabakar (*selfignition*) sehingga memerlukan penanganan khusus saat disimpan maupun ditransportasikan. Sumberdaya dan cadangan batubara peringkat rendah di Indonesia yang cukup tinggi tentu memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan melalui proses peningkatan kualitasnya sehingga cocok dengan kebutuhan pasar. Salah satu cara peningkatan kualitas batubara tersebut adalah melalui proses *upgrading* batubara dengan cara pengeringan untuk menurunkan kadar airnya.

Di Indonesia proses pengeringan dengan maksud menurunkan kadar air belum diterapkan secara komersial karena sampai saat ini konsumen batubara baik PLTU, pabrik semen, maupun industry lainnya masih menggunakan batubara bituminous yang mempunyai kandungan air antara 13% dan 20%. Namun, cadangan batubara bituminous mulai menipis sehingga peningkatan kualitas (*upgrading*) batubara peringkat rendah di Indonesia dinilai sangat penting karena cadangannya cukup besar.

Kondisi *existing* saat ini, *upgrading* batubara peringkat rendah pada prinsipnya dilakukan dengan menurunkan kadar air sehingga nilai kalorinya meningkat. Secara umum teknologi *upgrading* batubara tersebut terdiri atas evaporasi dan non-evaporasi. Pada proses evaporasi, air dari batubara dikeluarkan dalam fasa gas. Batubara dipanaskan, baik secara langsung maupun tidak langsung dengan uap panas menggunakan *dryer* (misal *rotary tube dryer*, *fluidized bed dryer*, dan *flash dryer*). Dengan metode evaporasi ini, air bawaan memiliki kecenderungan untuk kembali terserap oleh batubara. Metode ini dapat diterapkan jika batubara tersebut akan segera digunakan.

Proses evaporasi dengan pelapisan (*coating*) atau pembriketan pasca proses dapat membantu kestabilan kadar air. Proses pelapisan menggunakan residu atau ter akan melapisi permukaan batubara sehingga pori-pori yang terbuka akibat proses pemanasan akan tertutup. Begitu pula dengan proses pembriketan, karena tekanan yang tinggi, pori-pori batubara yang terbuka akan tertutup. Contoh teknologi ini adalah *Zemag*, *Wirbelschicht Trocknung Anlage* (WTA), dan *cold-dry*. Sedangkan teknologi *upgrading* yang dikembangkan oleh tekMIRA adalah *Upgraded Brown Coal* (UBC) dan *Coal Drying & Briqueing* (CDB).

Proses non-evaporasi, air dalam batubara dikeluarkan dalam fasa cair karena penggunaan tekanan tinggi pada saat proses. Temperatur dan tekanan tinggi menyebabkan terjadinya penguapan air bebas, air bawaan, tar, hidrogen, CO₂, CO, dan hidrokarbon. Tar yang keluar dari batubara akan menutupi poripori permukaan batubara yang terbuka karena proses pemanasan sehingga batubara produk proses ini kadar airnya relative stabil. Contoh teknologi ini adalah *K-fuel*, *Fleissner*, *HotWater Drying* (HWD), dan *Exergen Continuous Hydro Thermal Drying* (CHTD).

4.2.9.1. Upgraded Brown Coal (UBC)

UBC merupakan teknologi peningkatan kualitas batubara peringkat rendah yang dikembangkan bersama antara Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara (tekMIRA)

dengan pemilik teknologi yaitu Kobe Steel Ltd. Jepang. Pilot plant kapasitas 5 ton/hari telah dibangun di Palimanan dan mulai beroperasi sejak 2003 dan *demonstration plant* di Satui, Kalimantan Selatan pada 2006 sampai 2011.

Proses UBC dilakukan dengan memanaskan batubara (< 3mm) yang telah dicampur kerosin dan residu (*low sulfur wax residue*, LSWR) pada temperatur $\pm 150^{\circ}\text{C}$ dan tekanan 0,35 MPa ($\pm 3,5$ atm). LSWR merupakan senyawa organik yang beberapa sifat kimianya memiliki kesamaan dengan batubara, akan teradsorpsi secara selektif ke dalam pori-pori batubara kemudian mengering dan bersatu dengan batubara. Lapisan LSWR ini menempel cukup kuat sehingga batubara dapat disimpan di tempat terbuka

untuk jangka waktu yang cukup lama. Sedangkan kerosin diperlukan sebagai media dalam proses. Kerosin yang telah dipakai dipisahkan dari air (berasal dari batubara) berdasarkan perbedaan berat jenis dan dapat digunakan kembali untuk proses berikutnya. Produk UBC dapat berupa serbuk atau briket tergantung kepada lokasi pengguna akhir.

4.2.9.2. Coal Drying and Briquetting (CDB)

Teknologi CDB dikembangkan oleh tekMIRA untuk memperbaiki teknologi UBC yang membutuhkan rantai yang panjang dalam prosesnya sehingga biaya operasionalnya mahal. Teknologi CDB pada skala *bench* terdapat di Palimanan dan siap untuk ditingkatkan ke skala *pilot*. Dalam proses CDB, umpan batubara diremuk dan digiling menjadi ukuran di bawah 8 mm kemudian dikeringkan menggunakan *steam tube dryer*. Dengan demikian kandungan air dalam batubara akan turun dari 45-65% menjadi 10-15% yang secara otomatis akan menaikkan nilai kalor batubara tersebut menjadi >5.300 kal/g.

Hasil proses CDB bisa dalam bentuk briket maupun serbuk. Briket dibuat tanpa menggunakan bahan perekat memakai *double roll briquete machine* tekanan tinggi, berkisar 15-19 MPa. Dari Tabel 4.5 terlihat bahwa proses UBC lebih kompleks dan membutuhkan media, sedangkan proses CDB lebih sederhana dan tidak membutuhkan media sehingga biaya proses jauh lebih murah. Namun, batubara produk UBC memungkinkan untuk disimpan dalam jangka waktu lama dan dapat ditransportasikan pada jarak jauh (ekspor). Studi tentang pengiriman batubara produk UBC sudah dilakukan, yaitu dengan mengirimkannya dari Palimanan ke Jepang baik bulk dalam palka maupun disimpan dalam *container*. Hasil menunjukkan bahwa batubara produk UBC aman untuk ditransportasi jarak jauh tanpa terjadi swabakar.

Tabel 4.5. Perbedaan Proses UBC dan CDB

Metode	UBC	CDB
Upgrading		
Suhu operasi ($^{\circ}\text{C}$)	160	230
Tekanan (atm)	13,508	1
Umpan batubara	<i>Slurry</i>	Solid (bongkah)
Media	Kerosin dan SLWS	Tanpa media
Proses	Sederhana	Kompleks
Produk	Penggunaan	Dapat diekspor langsung

Sumber: Road Map Pengembangan dan Pemanfaatan Batubara 2021 – 2045

4.2.10. Batubara Sebagai Sumber Material Maju Carbon

Material maju berbahan baku karbon dapat diperoleh dari batubara. Material maju yang dimaksud dalam hal ini adalah material maju berbahan karbon yang memiliki sifat fisik seperti stabilitas termal dan sifat mekanik yang sangat baik atau sifat kimia yaitu mampu menjadi material penyimpanan energi. Material karbon maju akan mendukung kemajuan pengembangan teknologi dirgantara & pertahanan, elektronik, olahraga, otomotif, konstruksi, dan energi. Material maju yang akan dibahas adalah serat karbon, grafit, dan *carbon nano tube*. Material maju karbon tersebut dapat disintesis dari produk destilasi tar batubara yang dinamakan *coal tar pitch* (CTP).

4.2.10.1. Serat Karbon (*Carbon Fibre*)

Material disebut dalam bentuk serat bila mempunyai rasio panjang per diameter sangat besar. Seratkarbon (CF) memiliki diameter filamen antara 5 - 15 mikron dengan panjang dapat mencapai ratusan meter tergantung kebutuhan. Serat karbon digunakan terutama sebagai bahan penguat (tulangan) dalam komposit dengan matriks resin sintesis seperti epoksi, polimida, ester vinil, fenolik, dan material termoplastik lainnya. Komposit ini umumnya dikenal sebagai CFRP (*Carbon Fibre Reinforce Polymer*). CFRP dianggap sebagai teknologi energi bersih karena posisinya sebagai bahan pendukung kegiatan konservasi energi dan penerapan energi baru dan terbarukan. Sebagai contoh, CFRP dapat mengurangi berat kendaraan sehingga mengurangi penggunaan bahan bakar.

4.2.10.2. Grafit

Grafit adalah material yang tersusun dari unsur karbon murni yang membentuk kristal heksagonal. Grafit selain digunakan dalam pensil juga digunakan sebagai pigmen dan agen *molding* di bidang manufaktur kaca, sebagai anode baterai, dan sebagai moderator elektron pada reaktor nuklir. Pasar grafit masih terbuka lebar mengingat perkembangan teknologi baterai masih berevolusi hingga saat ini. Walaupun teknologi baterai mulai bergeser dari Li-ion yang relatif mahal ke teknologi baru berbasis kation lainnya (Na, Al, Si), material anode karbon berbasis grafit sintetik diprediksi akan terus mendominasi pasar setidaknya hingga ditemukan anode lain yang jauh lebih ekonomis.

4.2.10.3. Carbon Nanotubes (*Graphene*)

Graphene merupakan lapisan tunggal dari grafit. *Graphene* adalah struktur kristal alotrop karbon yang paling sederhana dan mendasari pembentukan material maju turunan karbon lainnya seperti *Carbon Nanotube* (CNT) dan grafit sintetik. Aplikasi CNT di antaranya adalah sebagai kemasan (*carrier*) pada pengiriman obat-obatan, zat penghambat pertumbuhan kanker paru-paru, rekayasa genetika, implant buatan, pengawet, dan katalis. Sebanyak lebih dari 70% market CNT didominasi oleh produk plastik dan komposit, diikuti oleh industri elektronik dan industri energi sebesar 10% dan 8%. Sedangkan sisanya sebesar 13% digunakan untuk beragam industri mulai dari tekstil, *printing packaging*, dan aditif.

4.2.11. Batubara untuk Material Agro Industri

Lebih dari 60 juta ha lahan di Indonesia digunakan untuk kegiatan perkebunan dan pertanian (BPS, 2020). Kegiatan usaha tersebut meliputi komoditas kelapa sawit, padi, jagung, karet, kelapa, hortikultura, kakao, kopi, singkong, kedelai, tebu, tembakau, kacang hijau, teh, dan ubi jalar. Kegiatan perkebunan dan pertanian tentu tidak dapat dilepaskan dari pasokan kebutuhan pupuk untuk mempertahankan produktivitas dan kualitas produknya. Khusus untuk komoditas kelapa sawit dan padi saja misalnya dibutuhkan sekitar 1 ton pupuk setiap hektarnya dalam setahun. Dengan demikian dapat diperkirakan bahwa kebutuhan pupuk untuk kedua komoditas tersebut sebesar 21 juta ton setiap tahunnya.

Produksi pupuk nasional pada tahun 2018 adalah sebesar 11.661.055 ton dan meningkat pada tahun 2019 menjadi 11.838.452 ton. Produksi pupuk nasional kembali meningkat pada 2020 hingga mencapai 12.254.676 ton. Jumlah produksi pupuk ini tentu belum ideal untuk dapat mencukupi kebutuhan pupuk nasional sehingga impor pupuk tidak terhindarkan. Hal ini mengindikasikan bahwa total luas lahan dengan total produksi dan impor pupuk di Indonesia sangat tidak sebanding. Untuk itu diperlukan produksi pupuk nasional dari sumber lain yang non konvensional untuk memenuhi kebutuhan pupuk nasional sekaligus mengurangi defisit neraca perdagangan dari sektor pupuk.

Batubara dapat menjadi sumber alternatif bagi produksi pupuk nasional karena memiliki unsur hara yang sangat lengkap. Batubara, terutama yang berumur muda (kalori rendah-sedang), mengandung kadar karbon relatif rendah (70-75%), hidrogen (5,5%), dan oksigen (20-25%). Selain itu, batubara muda pun memiliki kandungan lain seperti nitrogen, di fosfor penta oksida (P_2O_5), dan kalium oksida. Dengan demikian batubara tersebut telah memenuhi syarat untuk meningkatkan kandungan unsur hara makro di dalam media tanam.

Selain itu pemanfaatan batubara sebagai pupuk dapat mengurangi potensi terjadinya degradasi kualitas lahan pertanian. Degradasi tersebut dapat terjadi karena penerapan metode pertanian di Indonesia yang hanya mengembalikan unsur hara ke dalam tanah meliputi 3 unsur saja, yaitu nitrogen, fosfor, dan kalium. Padahal dalam satu siklus pertanaman terdapat 23 unsur tanah yang perlu diserap oleh tanaman. Rusak atau menurunnya kualitas tanah tersebut berdampak kepada kecenderungan penurunan produktivitas dan kandungan gizi komoditas pangan.

Berdasarkan karakteristik dan implementasinya, ada beberapa keuntungan dari pemanfaatan batubara sebagai pupuk, yaitu:

1. Kesuburan tanah dan kebutuhan hara untuk tanaman akan dapat dipertahankan;
2. Kandungan unsur hara pupuk relatif sama dengan kandungan tanaman;
3. Bahan baku pupuk terbaik berasal dari tanaman dan harus tersedia dalam jumlah yang banyak;
4. Pupuk dapat dibuat dalam waktu singkat, skala yang besar dan masif serta biaya murah; dan
5. Tidak mengubah kebiasaan dalam aplikasi.

Dalam pembuatan pupuk dari batubara yang sempurna harus mengikuti 3 tahapan proses utama, yaitu:

1. Proses pemotongan rantai karbon panjang;
2. Proses pemecahan ikatan karbon kompleks, dengan tujuan untuk mendapatkan unsur-unsur hara yang sebelumnya terikat di dalamnya; dan
3. Proses aktivasi hara untuk dimanfaatkan oleh tanaman sebagai pupuk.

BAGIAN 5

PEMANFAATAN LIMBAH ABU BATUBARA (FABA)

5.1. Pendahuluan

Abu yang dihasilkan dari pembakaran batubara, terutama dari PLTU terdiri dari dua jenis, yaitu partikel/abu yang berukuran halus dan partikel yang berukuran kasar. Partikel atau abu yang berukuran halus dan akan beterbang saat pembakaran batubara, dikenal sebagai abu terbang (*fly ash*) dan partikel atau abuyang tersisa mengendap di bagian bawah saat batubara dibakar dikenal sebagai abu dasar (*bottom ash*). Kedua produk sisa hasil pembakaran batubara ini selanjutnya dikenal sebagai FABA, singkatan dari *Fly Ash* dan *Bottom Ash*.

Secara fisik *fly ash* tampilannya seperti debu halus serupa dengan abuvulkanik dari aktivitas gunung berapi sedangkan *bottom ash* serupa dengan pasir halus. *Fly ash* cenderung memiliki tekstur yang lebih halus dibandingkan dengan abu vulkanik. Pembakaran batubara di kegiatan PLTU dilakukan pada temperatur tinggi, sehingga kandungan *unburnt carbon* di dalam FABA menjadi minimum dan lebih stabil saat disimpan.

Abu batubara mengandung SiO_2 , Al_2O_3 , P_2O_5 , dan Fe_2O_3 yang cukup tinggi sehingga abu batubara memenuhi kriteria sebagai bahan yang memiliki sifat semen/pozzolan. *Fly ash* merupakan campuran amorf mineral ferroaluminosilikat yang dihasilkan dari pembakaran tanah atau bubuk batubara pada suhu 400–1500 °C. Hasil uji karakteristik fisik dan kimia salah satu FABA dari PLTU dapat dilihat pada Tabel 5.1.

Fly ash sebenarnya tidak memiliki kemampuan mengikat seperti halnya semen, namun dengan kehadiran air dan ukurannya yang halus, oksida silika yang dikandung di dalam abu batubara akan bereaksi secara kimia dengan kalsium hidroksida yang terbentuk dari proses hidrasi semen dan akan menghasilkan zat yang memiliki kemampuan yang mengikat (Hardjito, 2001). Dalam SNI 03-6863-2002 (2002:146) spesifikasi *fly ash* sebagai bahan untuk campuran beton disebutkan ada 3 jenis, yaitu :

1. *Fly ash* jenis N, ialah *fly ash* hasil kalsinasi dari pozzolan alam misalnya tanah diatomite, shale, tuft, dan batu apung.
2. *Fly ash* jenis F, ialah *fly ash* yang dihasilkan dari pembakaran batu bara jenis antrasit pada suhu kurang lebih 1560°C
3. *Fly ash* jenis C, ialah *fly ash* hasil pembakaran lignit/batu bara dengan kadar karbon sekitar 60%. *Fly ash* jenis ini mempunyai sifat seperti semen dengan kadar kapur di atas 10%.

Fly ash jenis F maupun jenis C mempunyai karakteristik yang hampir sama. Yang membedakan keduanya hanyalah komposisi kimia yang terkandung di dalamnya. *Fly ash* jenis F biasanya berasal dari hasil pembakaran bitumen batu bara, mempunyai total kandungan silika (SiO_2), Alumina (Al_2O_3) dan ferum oksida (Fe_2O_3) minimum 70% dari berat total campuran dan kandungan kalsium oksida (CaO) yang rendah, yaitu kurang dari

10%. Walaupun jenis ini mempunyai bahan mineral kristalin yang tidak reaktif, *fly ash* jenis F ini masih memiliki sifat *pozzolan*. *Fly ash* jenis F ini memiliki tingkat penambahan panas yang lambat dibandingkan dengan *fly ash* jenis C (Vargas, J. A. 2007 dalam Mardiah dkk., 2018).

Tabel 5.1. Karakteristik Fisik dan Kimia dari Hasil Uji FABA PLTU (Naresh, 2010)

<i>Engineering Properties</i>	<i>Ranges</i>	
	Bottom Ash	Fly Ash
Grain size, %		
-Clay	0	0
-Silt	15-40	60-90
-Sand	50-80	05-20
-Gravel	0	0
Specific Gravity	1.85	1.84
Maximum Dry Density (gm/cc)	1.004	1.037
Optimum Moisture Content, %	39.4	40.6
Effective Cohesion, (kg/cm ²)	0	0
Effective angle of shearing resistance, degree	42	33
Coefficient of Permeability, (cm/sec)	10 ⁻² to 10 ⁻⁴	10 ⁻³ to 10 ⁻⁸

<i>Chemical Constituents</i>	<i>Range (%)</i>	
	Bottom Ash	Fly Ash
Silica (SiO ₂)	70.0	73.2
Alumina(Al ₂ O ₃)	24.4	21.3
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	2.50	2.56
Calcium Oxide (CaO)	0.50	0.60
Magnesium Oxide (MgO)	1.1	1.0
Sulphur Oxide (SO ₃)	0.5	0.5

Fly ash jenis C biasanya berasal dari pembakaran sub-bitumen batu bara dengan kandungan silica (SiO₂), alumina (Al₂O₃) dan ferum oksida (Fe₂O₃) sedikitnya mencapai 50% dari berat total dan kandungan kalsium oksida yang tinggi yaitu berkisar antara 10% sampai 30%. Hampir semua bahan mineral yang dikandung oleh *fly ash* jenis ini memiliki sifat yang reaktif, sehingga memiliki sifat *pozzolan* dan juga sifat semen. *Fly ash* jenis C digunakan apabila dibutuhkan beton dengan kekuatan awal yang tinggi, karena salah satu cirinya adalah memiliki kekuatan awal yang tinggi dibandingkan dengan jenis F (Vargas, J. A. 2007 dalam Mardiah dkk. 2018).

Berdasarkan ASTM C618-84a, kandungan kimia *fly ash* jenis C adalah CaO, SiO₂, Al₂O₃. *Fly ash* jenis ini berasal dari pembakaran batu bara subbituminous dan mempunyai berat jenis sekitar 2.31 – 2.86 Ton/m³ (ACI 226 3R-87). *Fly ash* selama ini memiliki banyak kegunaan yang amat beragam antara lain dalam penyusunan beton jalan, bahan baku keramik, pengganti semen dan bahan baku pembuatan semen. Visualisasi *fly ash* yang digunakan berwarna kehitam-hitaman.

Abu terbang yang dapat digunakan dalam beton campuran yang mengandung abu

terbang berkisar antara 15% hingga 35% dari total bahan semen (semen Portland, pozzolan, dan mineral reaktif) (Vargas, 2007 dalam Mardiah dkk., 2018). Juga menurut Umbh dkk., 2014 dalam Mardiah dkk., 2018, kadar 30% abu terbang sebagai substitusi semen menghasilkan nilai kuat tekan beton yang cukup signifikan dan masih termasuk dalam klarifikasi beton mutu normal.

Bila ditinjau dari sifat kimianya, hasil uji karakteristik terhadap FABA PLTU, yang dilakukan oleh Kementerian LHK tahun 2020 menunjukkan bahwa FABAPLTU masih di bawah baku mutu karakter berbahaya dan beracun (*Badan Standardisasi Instrumen Lingkungan Hidup dan Kehutanan*). Hasil uji karakteristik menunjukkan bahwa FABA PLTU tidak mudah menyala dan tidak mudah meledak dengan suhu pengujian di atas 140°F. Hasil uji karakteristik FABA PLTU lainnya adalah tidak ditemukan hasil reaktif terhadap Sianida dan Sulfida, serta tidak ditemukan sifat korosif pada FABA PLTU. Selain itu, hasil evaluasi dari referensi yang tersedia, menyatakan bahwa hasil uji Prosedur Pelindian Karakteristik Beracun atau *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP) terhadap limbah FABA dari 19 unit PLTU, memberikan hasil uji bahwa semua parameter memenuhi baku mutu. Kemudian, hasil Uji Toksikologi *Lethal Dose-50* (LD50) dari 19 unit PLTU dengan hasil, nilai LD50 > 5000 mg/kg berat badan hewan uji. Hasil kajian *Human Health Risk Assessment* (HHRA) yang telah dijalankan di lokasi untuk mengevaluasi potensi resiko bagi pekerja lapangan menunjukkan bahwa, tidak ada parameter yang melebihi *Toxicity Reference Value* (TRV) yang ditentukan Kementerian Tenaga Kerja Indonesia yang didefinisikan dalam Peraturan Menteri Tenaga Kerja No. 5 Tahun 2018. Dengan demikian, dari hasil ujikarakteristik menunjukkan limbah FABA dari PLTU tidak memenuhi karakteristik sebagai limbah Bahan Berbahaya dan Beracun. Atas dasar tersebut, berdasarkan Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan, material FABAYang merupakan limbah hasil sisa pembakaran di PLTU selain yang menggunakan *stoker boiler* dinyatakan sebagai limbah non-B3 terdaftar dengan kode limbah N106 untuk *fly ash* dan N107 untuk *bottom ash*. Berdasarkan PP nomor 22 tahun 2021 pasal 459, setiap orang yang menghasilkan Limbah non-B3 atau pihak lain dapat melakukan pemanfaatan limbah non B-3.

Mulyana, 2021 menyampaikan bahwa Negara Amerika Serikat, Australia, Kanada, Eropa, Jepang, Rusia, Afrika Selatan, dan di 3 (tiga) negara dengan tujuan ekspor batubara Indonesia terbesar, yaitu China, India dan Korea Selatan, tidak mengkategorikan FABA sebagai limbah B3 melainkan sebagai limbah padat (China dan India), dan sebagai *specified by-product* (Korea Selatan). FABA secara luas telah banyak dimanfaatkan sebagai material pendukung pada sektor infrastruktur, stabilisasi lahan, reklamasi pada lahan bekas tambang, dan sektor pertanian.

Bottom ash merupakan limbah yang dihasilkan dari pembakaran batubara pada berbagai pembangkit listrik dan industri. *Bottom ash* terdapat dalam jumlah yang cukup besar, sehingga memerlukan pengelolaan agar tidak menimbulkan masalah lingkungan, seperti pencemaran udara, air dan tanah. *Bottom ash* mempunyai ukuran partikel lebih besar dan lebih berat dari pada *fly ash*, sehingga *bottom ash* akan jatuh pada dasar tungku pembakaran (*boiler*) dan terkumpul pada penampung debu (*ash hopper*) lalu dikeluarkan dari tungku dengan cara disemprot dengan air untuk kemudian dibuang atau dipakai sebagai bahan tambahan pada perkerasan jalan (Santoso, I., Roy, S. K., Andarias, P. 2004).

Bottom ash dikategorikan menjadi *dry bottom ash* dan *wet bottom ash/boiler slag*

berdasarkan jenis tungkunya yaitu *dry bottom boiler* yang menghasilkan *dry bottom ash* dan *slag-tap boiler* serta *cyclone boiler* yang menghasilkan *wet bottom ash (boiler slag)*. Sifat dari *bottom ash* sangat bervariasi karena dipengaruhi oleh jenis batu bara dan sistem pembakarannya (Santoso, I., Roy, S. K., Andarias, P. 2004). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Aggarwal, dengan menggunakan *bottom ash* yang memiliki kandungan karbonat tinggi dan bersifat pozzolan sebagai pengganti agregat dalam campuran beton akan membuat beton mengalami peningkatan yang lambat pada awal-awal perkerasannya dan akan mengalami penambahan kekuatan yang besar setelah beton berumur 28 hari (Aggarwal, P., Aggarwal, Y., Gupta, S.M. 2007). Namun, tidak demikian dengan percobaan yang dilakukan oleh Yuksel, Billir, Dan Ozkan. Dengan menggunakan *bottom ash* yang tidak memiliki kadar kalsium tinggi, didapatkan kesimpulan bahwa penggunaan *bottom ash* akan menurunkan kekuatan beton akhir. Selain itu, beton akan memiliki banyak pori sehingga beton menjadi lebih porus (Yu'ksel, I., Bilir, T., Ozkan. (2007). Sehingga apabila kekuatan ingin bertambah, harus dilakukan pemilihan *bottom ash* yang memiliki kandungan karbonat yang tinggi.

Pemanfaatan limbah non-B3 secara umum dapat berupa:

- a. Pemanfaatan limbah non-B3 sebagai substitusi bahan baku.
- b. Pemanfaatan limbah non-B3 sebagai substitusi sumber energi.
- c. Pemanfaatan limbah non-B3 sebagai bahan baku.
- d. Pemanfaatan limbah non-B3 sebagai produk samping.
- e. Pemanfaatan limbah non-B3 sesuai dengan perkembangan ilmpengetahuan dan teknologi.

Beberapa bentuk pemanfaatan Limbah non-B3 sebagai substitusi bahan baku adalah:

- a. Pembuatan beton, batako, *paving block*, beton ringan, dan bahan konstruksi lainnya yang sejenis.
- b. Industri semen.
- c. Pemadatan tanah.
- d. Bentuk lainnya sesuai dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

FABA memiliki peluang untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku, yaitu pemanfaatan Limbah non B3 khusus seperti *fly ash* batubara dari kegiatan PLTU dengan teknologi *boiler* minimal *Circulating Fluidized Bed (CFB)* dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku konstruksi pengganti semen pozzolan (penjelasan pasal 459, PP 22/2021). Pemanfaatan FABA sebagai *roadbase* dapat menyerap 94% dari total abu batubara (PT AMNT). FABA berpotensi digunakan bahan baku pembuatan refraktori cor, penimbunan dalam reklamasi tambang, substitusi kapur untuk menetralkan air asam tambang, memperbaiki kondisi fisik tanah dan media tanam untuk revegetasi lahan bekas tambang (*Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara, Kementerian ESDM*).

LIPI, JICA dan HAKKO bekerja sama memproduksi beton ramah lingkungan menggunakan bahan baku FABA (Siaran Pers Kemen LHK & kemen ESDM Nomor: SP.078/HUMAS/PP/HMS.3/3/2021). Balai Penelitian Tanah Kementerian Pertanian menyatakan, aplikasi FABA dapat meningkatkan efisiensi pemupukan serta memperbaiki lingkungan perakaran tanaman. FABA juga dapat dimanfaatkan sebagai *backfilling* atau batuan penutup untuk pencegahan air asam tambang (perusahaan pertambangan).

5.2. Pemanfaatan FABA di Indonesia

Mengacu pada pemanfaatan FABA sebagai produk limbah jenis Non B-3, maka FABA dapat dimanfaatkan sebagai substitusi bahan baku, sebagai bahan baku dan manfaat lain sesuai kemajuan ilmu pengetahuan.

5.2.1. FABA untuk Bahan Baku Semen

Industri pembangkitan listrik berbahan bakar batubara di seluruh wilayah Indonesia dalam program pemerintah 10.000 MW (ditambah program 35.000 MW dengan 80% PLTU) memiliki masalah dengan pengelolaan *byproduct* berupa abu terbang (*fly ash*) bersifat *pozzolan* yang sebenarnya secara faktual memiliki potensi untuk menggantikan semen *portland* sebagai bahan utama beton, bahkan memberikan pengaruh yang lebih baik terhadap struktur beton dan lingkungan. Pemanfaatan limbah non-B3 FABA sebagai substitusi bahan baku semen Portland sebagai bahan utama beton dapat membantu menyelesaikan masalah tersebut.

Saat ini jumlah FABA di Indonesia terus bertambah seiring dengan perkembangan dan pertumbuhan industri manufaktur serta meningkatnya kebutuhan listrik yang dipasang PLTU. FABA yang dihasilkan dari PLTU saja pada tahun 2021 diperkirakan mencapai 12 juta ton dan pada tahun 2027 diproyeksikan menjadi sebesar 16,2 juta ton. Hal ini menimbulkan permasalahan karena FABA yang dimanfaatkan kembali jumlahnya sangat sedikit sehingga sisanya harus disimpan dan/atau ditimbun (*landfill*).

Industri semen merupakan industri yang bisa menjadi penghasil sekaligus pengguna FABA. Industri semen yang memiliki pembangkit listrik tenaga uap menggunakan batu bara sebagai bahan bakar sehingga industri semen termasuk industri yang menghasilkan FABA sebagai limbah. Industri semen juga dapat memanfaatkan FABA sebagai bahan tambahan. Berdasarkan SNI 7064:2014 semen portland komposit diperbolehkan menggunakan FABA maksimal 35% dalam pembuatan semen portland komposit (*portland composite cement*). Semen portland komposit merupakan jenis semen yang lebih ramah lingkungan karena menggunakan klinker yang lebih sedikit serta menggunakan limbah berupa FABA yang bersumber dari pembangkit listrik sendiri maupun membeli dari sumber di luar pabrik (Hanafie, 2021).

5.2.2. Pemanfaatan FABA untuk Kontruksi Jalan dan Bahan Bangunan

Pemanfaatan FABA untuk kontruksi jalan diantaranya adalah untuk *subgrade* (untuk stabilisasi tanah), minimal CBR 10%, untuk *sub base course* (lapisan pondasi bawah), dengan nilai minimal CBR 60% dan untuk *road base* (lapisan pondasi atas) minimal nilai CBR 90%.

FABA juga bisa digunakan untuk perkerasan beton (*ready mix*), beton pra cetak, perkerasan aspal, bata beton (paving blok), bata beton untuk pasangan dinding (batako), substitusi agregat buatan dan sejenisnya, mortar/perekat, nat/batako dan sejenisnya, bata ringan (*cellular lightweight concrete*) atau hebel, bahan geneng beton dan untuk plesteren dinding dan lantai.

5.2.2. Pemanfaatan FABA untuk Bata Ringan (*Cellular Lightweight Concrete*)

Bata ringan *Celullar Lightweight Concrete* (CLC) adalah bata ringan yang diproduksi

dengan mencampurkan gelembung udara ke dalam campuran adonan bata. Gelembung udara ini memiliki sifat yang stabil, sehingga dapat menjaga struktur bata ringan selama proses curing tanpa perlu terjadi reaksi kimia.

FABA dimanfaatkan sebagai pengganti agregat halus dalam pembuatan bata ringan. Bata ringan yang dimaksud adalah bata ringan jenis *Cellular Lightweight Concrete (CLC)*. Bata ringan ini umumnya memiliki kuat tekan yang tinggi dengan berat yang lebih ringan dibandingkan jenis bata lain, sehingga beban konstruksi yang ditanggung bangunan dapat berkurang. Selain itu bata ringan juga memiliki isolasi panas dan suara yang baik. Hal tersebutlah yang menjadi keunggulan bata ringan dibanding bahan bangunan lain.

Bata ringan merupakan bata beton yang memiliki densitas lebih ringan dari pada bata beton pada umumnya. Keunggulan utama bata ringan terdapat pada berat sendirinya yang kecil, sehingga apabila digunakan pada proyek bangunan tinggi akan mengurangi beban bangunan itu sendiri. Secara umum terdapat 2 macam jenis bata ringan yaitu *Aerated Lightweight Concrete (ALC)* atau juga sering disebut *Autoclaved Aerated Concrete (AAC)* dan *Cellular Lightweight Concrete (CLC)*. Bata ringan AAC adalah beton selular yang gelembung udaranya dihasilkan reaksi kimia, yaitu ketika bubuk aluminium atau aluminium pasta mengembang seperti pada proses pembuatan roti saat penambahan ragi untuk mengembangkan adonan. Sedangkan bata ringan CLC adalah bata selular yang mengalami proses perawatan secara alami. Dalam proses pengerjaan CLC digunakan busa organik yang sangat stabil dan ketika proses pencampuran adonan tidak ada reaksi kimia.

Persyaratan fisik yang harus dipenuhi oleh bata beton pejal agar memenuhi SNI 03-0349-1989 sebagai referensi bata ringan ditunjukkan dalam Tabel 5.2

Tabel 5.2. Syarat Fisik Bata Beton (SNI 03-0349-1989)

Syarat Fisik	Satuan	Tingkat Mutu Bata Beton Pejal				Tingkat Mutu Bata Beton Berlubang			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV
Kuat tekan bruto* rata-rata min.	kg/cm ²	100	70	40	25	70	50	35	20
	MPa	9,8	6,9	3,9	2,5	6,8	4,9	3,4	2,0
Kuat tekan bruto* masing-masing benda uji min.	kg/cm ²	90	65	35	21	65	45	30	17
	MPa	8,8	6,4	2,4	2,1	6,4	4,4	3,0	1,7
Penyerapan air rata-rata maks.	%	25	35	-	-	25	35	-	-

Kuat tekan bruto yang dimaksud dalam SNI 03-0349-1989 adalah gaya tekan keseluruhan yang diterapkan pada benda uji pada saat benda uji tersebut pecah atau mengalami kegagalan akibat tekanan. Nilai ini dihitung dengan membandingkan antara beban tekan keseluruhan dengan luas ukuran horisontal yang mengenai plat penekan, termasuk luas lubang dan cekungan tepi yang ada pada bata tersebut.

Syarat fisik kelayakan bata pejal yang harus dipenuhi berdasarkan SNI 03-0349-1989 yang akan digunakan sebagai acuan bata ringan. Menurut SNI 03-0349-1989, jenis bata ini terdiri dari :

- 1) Mutu I, merupakan bata beton yang digunakan untuk konstruksi yang memikul

beban dan konstruksi tidak terlindung (di luar atap).

- 2) Mutu II, merupakan bata beton yang memikul beban tetapi penggunaannya hanya konstruksi yang terlindung dari cuaca luar (dibawah atap).
- 3) Mutu III, merupakan bata beton yang digunakan dengan tidak dibebani, terlindung dan tidak diplester.
- 4) Mutu IV, batako yang digunakan untuk konstruksi yang tidak memikul beban, dinding penyekat dan lain-lain serta konstruksinya yang terlindung dari cuaca luar.

Di Indonesia, peraturan beton PBI-1971, yang telah diperbarui dengan SNI 03-2847-2002 menetapkan kuat tekan beton pada usia 28 hari, yang diberi notasi $f'c$. Beton pada usia 28 hari dapat dibedakan menjadi tiga mutu berdasarkan kekuatan tekannya, yaitu:

- 1) Mutu beton dengan $f'c$ kurang dari 10 MPa, biasanya digunakan untuk beton non-struktural seperti kolom praktis dan balok praktis.
- 2) Mutu beton dengan $f'c$ antara 10 MPa sampai 20 MPa, digunakan untuk beton struktural seperti balok, kolom, pelat, dan fondasi.
- 3) Mutu beton dengan $f'c$ lebih besar dari 20 MPa, digunakan untuk struktur beton yang dirancang untuk tahan gempa.

Ditinjau dari segi pembuatannya, menurut Neville (1995) bata ringan dibedakan menjadi 3 (tiga) yakni :

- 1) Menggunakan agregat ringan yakni, bata ringan dapat dibuat dengan menggunakan agregat kasar yang ringan, agregat halus yang ringan, atau kombinasi keduanya.
- 2) Pembuatan gelembung udara yakni, bata ringan dapat dibuat dengan menciptakan gelembung-gelembung udara kecil di dalamnya. Hal ini dapat dicapai dengan menggunakan bahan tertentu yang menyebabkan terbentuknya gelembung udara.
- 3) Tanpa menggunakan pasir yakni, bata ringan juga dapat diproduksi tanpa menggunakan pasir, sehingga menyebabkan banyaknya rongga di antara butiran agregat kasar. Metode ini disebut sebagai "bata non pasir."

Menurut SNI 03-2847-2002, beton dalam hal ini termasuk bata ringan dapat diklasifikasikan berdasarkan densitasnya, yaitu :

- 1) Beton ringan, mempunyai densitas kurang dari 1900 kg/m³.
- 2) Beton normal, mempunyai densitas 2200 kg/m³ – 2500 kg/m³.
- 3) Beton berat, mempunyai densitas lebih dari 2500 kg/m³.

Bata ringan CLC memiliki berbagai kelebihan yaitu :

- 1) Lebih mudah saat pengecoran karena tidak ada agregat kasar, sehingga proses pengecoran menjadi lebih lancar dan mudah dilakukan.
- 2) Densitas bata ringan CLC lebih ringan daripada batu bata merah, sehingga pembebanan pada plat dan balok bangunan dapat dikurangi, mengurangi beban struktural keseluruhan.
- 3) Tekstur halus dan ukurannya lebih presisi, sehingga pemasangan bata lebih rapi dan memungkinkan penggunaan plesteran yang lebih tipis.
- 4) Bata ringan CLC memiliki bentuk yang akurat dan mudah dipasang, sehingga mempercepat dan mempermudah proses konstruksi bangunan.
- 5) Bata ringan yang lebih ringan dari batu bata merah memudahkan dalam instalasi dan tidak memerlukan tenaga angkat yang berat.

- 6) Lebih ekonomis jika dibandingkan dengan bata ringan AAC, karena pada proses *curing* bata ringan CLC tidak membutuhkan oven *autoclave* seperti pada pembuatan bata ringan AAC.

Pemanfaatan *fly ash* dan *bottom ash* sebagai bata ringan sangat berpotensi karena saat ini berbagai proyek konstruksi sedang gencar-gencarnya berlangsung, seperti proyek perumahan. Selain itu pemanfaatan *fly ash* dan *bottom ash* juga dapat bermanfaat bagi lingkungan karena dapat mengurangi dan memanfaatkan limbah yang dihasilkan oleh PLTU.

Untuk membuat bata ringan CLC dibutuhkan campuran dengan variasi komposisi semen, *fly ash* dan *bottom ash* tertentu. Parameter data yang digunakan dalam uji kualitas biasanya berupa hasil pengujian densitas, kuat tekan, dan tingkat penyerapan air yang dilakukan pada saat umur bata ringan CLC 14, 28, dan 35 hari, serta konduktivitas termal yang dilakukan saat umur sampel 35 hari.

Menurut SNI 03-0349-1989 terdapat 3 (tiga) pengujian kualitas bata ringan, diantaranya :

1). Pengujian Kuat Tekan

Kuat tekan adalah kemampuan bahan untuk menahan gaya tekan yang diberikan terhadap penampang sampel uji yang mengakibatkan sampel tersebut hancur. Kuat tekan dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$P = \frac{F}{A}$$

Keterangan :

P = kuat tekan (Mpa atau N/mm²)

F = beban tekan maksimum (N)

A = luas permukaan bata ringan (mm²)

2). Pengujian Densitas

Densitas adalah perbandingan massa dengan volume total. Semakin tinggi densitas bata ringan, maka semakin besar massa yang terdapat dalam setiap volume unitnya. Selain itu, semakin besar densitas pada bata ringan, maka porositasnya akan semakin rendah. Dengan kata lain, densitas yang tinggi menunjukkan bahwa benda tersebut memiliki lebih sedikit pori-pori atau rongga di dalamnya.

Densitas dibedakan menjadi tiga, yaitu: bobot isi asli (*natural density*), bobot isi kering (*dry density*) dan bobot isi jenuh (*saturated density*). Densitas yang dihitung dalam penelitian adalah *dry density*, yakni densitas suatu benda atau material setelah mengalami proses pengeringan. Menurut SNI kualitas bata ringan, densitas yang disyaratkan adalah *dry density*. *Dry density* dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\gamma_d = \frac{m_o}{m_w - m_s} \rho_{air}$$

Keterangan :

γ_n = *dry density* (gram/cm³)

m_o = massa kering (gram)

m_w	= massa jenuh (gram)
m_s	= massa terdapat (gram)
ρ_{air}	= densitas air (1 gram/cm ³)

3). Pengujian Penyerapan Air

Pada saat terbentuknya agregat kemungkinan ada terjadinya udara yang terjebak dalam lapisan agregat atau terjadi karena dekomposisi mineral pembentuk akibat perubahan cuaca, maka terbentuklah lubang atau rongga kecil di dalam butiran agregat (pori). Pori dalam agregat mempunyai variasi yang cukup besar dan menyebar di seluruh tubuh butiran. Pori-pori mungkin menjadi reservoir air bebas di dalam agregat. Persentase berat air yang mampu diserap agregat di dalam air disebut serapan air. Untuk mengetahui besar penyerapan air dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$W_a = \left(\frac{m_o - m_w}{m_w} \right) \times 100\%$$

Keterangan :

W_a = Penyerapan air (*water absorption*) (%)

m_o = massa kering (gram)

m_w = massa jenuh (gram)

4). Pengujian Konduktivitas Termal

Konduktivitas termal merupakan laju panas pada suatu materi dengan suatu gradien temperatur. Dalam hal bata ringan, pengujian konduktivitas termal dilakukan untuk menentukan seberapa baik bata ringan dapat mengurangi aliran panas atau mempertahankan suhu ruangan di dalam bangunan. Semakin rendah nilai konduktivitas termal suatu bahan, semakin baik bahan tersebut dalam menjaga suhu di dalam bangunan. Oleh karena itu, pengujian konduktivitas termal pada bata ringan dilakukan untuk mengetahui seberapa baik bata ringan dalam mengisolasi panas.

Konduktivitas termal bata ringan dipengaruhi oleh massa jenis, kandungan uap air, dan komposisi mineral penyusunnya. Hubungan antara massa jenis bata ringan dan konduktivitas termalnya dapat dinyatakan oleh persamaan yang diusulkan oleh Valore (1980) dalam laporan American Concrete Institute ACI 122-OR berikut:

$$k_c = 0,072e^{0,00125d}$$

Keterangan :

k_c = konduktivitas termal (W/mK)

d = massa jenis kering (kg/m³)

Pada kondisi normal, tidak mungkin untuk mempertahankan bata ringan dalam kondisi kering karena adanya pengaruh uap air sehingga persamaan konduktivitas di atas perlu dikoreksi menjadi persamaan berikut :

$$k_c = 0,0865e^{0,00125d}$$

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 363, (1992), *State Of The Art Report On High-Strength Concrete*, American Concrete Institute, Detroit, USA
- Aerosol & Particulate Research Lab, (2011) April 27, 2011 *Adsorption*, <http://files.engineering.com/download.aspx?folder=72dc2393-de04-412e-aac0-0e72014a9c5b&file=adsorption.ppt>
- Alberty, R.A, 1990, *Kimia Fisika*, Jilid Kesatu, Erlangga, Jakarta
- Alqadrie R WN, Sudarmadji & Yuniarto T. 2000. Pengolahan air gambut untuk persediaan air bersih., *Teknosains* 13(2) Mei.
- Amri, A, Supranto dan Fakhrurozi,M. 2004. Keseimbangan adsorpsi optimal campuran Biner Cd(II) dan Cr(III) dengan zeolit alam terimpregnasi 2-merkaptobenzotiazol. *Jurnal Natur Indonesia* 6 (2): 111-117 (2004). ISSN 1410-9379.
- Apriliani, Ade. 2010. Pemanfaatan Arang Ampas Tebu sebagai Adsorben Ion Logam Cd, Cr, Cu dan Pb dalam Air Limbah. *Skripsi*. Fakultas Sains dan Teknologi. UIN Syarif Hidayatullah. Jakarta
- Arifin, S., 2022, Sandbag Pengertian dan Fungsinya, diakses pada 03/08/2023 dari <https://www.mutuutamageoteknik.co.id/sandbag-adalah-karung-geotextile-untuk-perkuatan/>
- Arya, T.D., Sriyanti, Pulungan, L.. (2019), Analisis Batubara Untuk Bahan Bakar Pembakaran Klinker di PT Cemindo Gemilang Semen Merah Putih Kecamatan Bayah Kabupaten Lebak Provinsi Banten, *Prosiding Teknik Pertambangan SPESIA* Vol. 5 No. 1, Unisba. <https://karyailmiah.unisba.ac.id/index.php/pertambangan/article/view/15068>
- Ash Fusion*, Kentucky Geological Survey, University of Kentucky, Lexington, University of Kentucky, Lexington <http://www.uky.edu/KGS/coal/coal-analyses-ash-fusion.php>
- Atkins, P. W., (1997), *Kimia Fisika* (Alih Bahasa: Dra. Irma I. K.), Erlangga, Jakarta.
- Aziz, M. 2006. *Karakterisasi Fly ash PLTU Suralaya dan Evaluasinya Untuk Refraktori Cor*. Bandung : Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral dan Batubara.
- Baruya, P., (2012), Losses in the Coal Supply Chain, *IEA Clean Coal Centre*, diakses pada 31 Juli 2023 dari https://www.researchgate.net/publication/324414238_Losses_in_the_coal_supply_chain
- Benefield, Larry D, 1982, *Proses Kimia Untuk Air dan Pengolahan Air Limbah*, Prentice Hall Inc., New Jersey.

- Bruce, R. and Mathew, T.,(2004), *Coal Combustion Products Utilization Handbook* (2nd Edition). Eng. Chem. Res. California: Texas A&M University, Brooks/Cole Engineering Division.
- Central Pollution Control Board, 2013, *Final Report of The Committee for Preparation of "Guidelines for Loading, Unloading and Nuisance Free Transportation of All Types of Fly ash, Including Bottom Ash Etc. Generated By Thermal Power Stations"*, Central Pollution Control Board, Delhi.
- Chen, J., Kong, H., Wu, D., Hu, Z., Wang, Z., and Wang, Y., 2006, Removal of phosphate from aqueous solution by zeolite synthesized from fly ash, *Journal of Colloid and Interface Science*, 300, 491–497.
- Chodijah, Siti. 2011. *Pemanfaatan arang batok kelapa dan batubara sebagai karbon aktif untuk material penyimpan hidrogen*. Depok: Universitas Indonesia
- Coal Beneficiation Process, diakses pada 30 Juli 2023 dari <https://mineraldressing.com/solution/coal-processing-plant/>
- Coal Preparation Plant | Coal Preparation Process | Coal Washing*, diakses pada 30 Juli 2023 dari <https://www.beidoou.com/mining/coal-preparation-plant.html>).
- Cotton, F.A. and G. Wilkinson. 1989. *Kimia Anorganik Dasar*. Terjemahan Sahati Suharto. Penerbit Universitas Indonesia (UI Press). Jakarta.
- Currie, J.M.,(1973), *Unit Operation in Mineral Processing*. British Columbia: Department of Chemical and Metallurgical Technology.
- Dogan, M., and Alkan, M. 2003, *Adsorption kinetics of methyl violet onto perlite*, *Chemosphere*, 50, 517–528
- Eckenfelder, 1981. *Industrial Water Pollution Control, Second Edition*, Mc. Graw-Hill International, Singapore.
- Elliot, M.A. dan YOHE, G.R., (1981), *The Coal Industry and Coal Research and Development in Prospective*, dalam LOWRY, H.H., *Chemistry of Coal Utilization – Second Supplementary Volume*, John Willey and Sons, New York, N.Y. USA.
- Fajarwati, A., 2010. Kajian Uji Kinetika Menggunakan *Free Draining Column Leach Test Dan Humidity Cell Test* Untuk Memprediksi Potensi Air Asam Tambang Batubara. Magister Rekayasa Pertambangan Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Fly Ash – Limbah B3 yang Bermanfaat Bagi Agrikultur*, diakses 14 Agustus 2023 dari: <https://www.universaleco.id/blog/detail/manfaat-fly-ash-limbah-b3-bagi-agrikultur/76>
- Format Instrumen Standardisasi, 2022, *Standar Mitigasi Dampak Pemanfaatan Limbah Non-B3 Faba dari PLTU Batubara untuk Substitusi Bahan Baku Pembuatan Beton*, <https://bsilhk.menlhk.go.id/standarlhk/wp-content/uploads/2022/12/3>.
- Hamzah, H., (2020), *Proses Pembuatan Semen*, diakses pada 29 Juli 2023 dari <http://duniagalery.blogspot.com/2015/06/kiln-proses-pembuatan-semen.html>

- Hardgrove Grindability Index (HGI) Machine*<https://www.rseprojects.co.za/products/hardgrove-grindability-index-machine-hgi/>.
- Hardjito, D., 2001, *Abu Terbang Solusi Pencemaran Semen*, diakses tanggal 18/8/2023 dari:https://www.researchgate.net/publication/43649856_Abu_Terbang_Solusi_Pencemaran_Semen#fullTextFileContent
- Hower, J.C., 1963, *International Handbook of Coal Petrography: Second Edition, 1963*, International Committee for Coal and Organic Petrology, 2001 CD ROM reprint, diakses pada 6 Agustus 2023 dari https://www.researchgate.net/publication/257002596_International_Handbook_of_Coal_Petrography_Second_Edition_1963_International_Committee_for_Coal_and_Organic_Petrology_2001_CD_ROM_reprint
- Restu A., Wijayanto, H., Effendi, F., Murwanti, S., 2018, *Penurunan Kadar Phenol dengan Memanfaatkan Bagasse Fly Ash*, diakses dari <https://adoc.pub>
- Indonesia Energy Outlook 2019*, Dewan Energi Nasional, diakses pada 11 Agustus 2023 dari <https://www.esdm.go.id/id/publikasi/indonesia-energy-outlook>
- John M. Currie. 1973. *Unit operation in mineral processing. British Columbia: Department of Chemical and Metallurgical Technology.*
- Kristianto, A., (2022), *Kebutuhan Batubara Industri Semen Melonjak*, diakses pada 18/07/2023 dari <https://www.cnbcindonesia.com/market/20220125193729-17-310426/>
- Kulkamil, S. J., Dhokpande, S. R, & Kaware, D. J. (2013). *Studies On Fly Ash As An Adsorbent for removal of various Pollutants from wastewater*, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* Vol. 2 Issue 5, May – 2013, diakses pada 5 Agustus 2023 dari <https://www.ijert.org/research/studies-on-flyash-as-an-adsorbent-for-removal-of-various-pollutants-from-wastewater-IJERTV2IS50668.pdf>.
- Kumar, V., K.A. Zacharia and G. Goswarni. 2001. *Fly Ash Use in Agriculture : A Perspective*. Tersedia di <http://www.tifac.orc.in>
- Landman, A. A. 2003. *Aspects of Solidstate Chemistry of Fly Ash and Ultramarine Pigments*. University of Pretoria 14-29.
- Lestari, D., Asy'ari, M.A., Hidayatullah, R., (2016), *Geokimia Batubara untuk Beberapa Industri*, *Jurnal POROS TEKNIK*, Volume 8 No. 1, hal : 1-54 diakses pada 20 Juli 2023, dari <https://media.neliti.com/media/publications/126911-ID-none.pdf>.
- Levine, Ira N., 2002, *Physical Chemistry, Fifth Edition*, Mc. Graw-Hill International, Singapore.
- Mardiah, R., Kamaldi, A., Olivia, M., 2018, *Porositas Beton Blended Abu Terbang (Fly Ash) Sebagai Substitusi Semen di Air Gambut*, *Jom FTEKNIK* Volume 5 Edisi 2 Juli s/d Desember 2018, diakses dari: <https://jom.unri.ac.id/index.php/JOMFTEKNIK/article/download/21829/21124>.

- Mikendová, B., Thomas, J., Denek, T., Phosphorus Removal from Water Using Fly Ash and Modified Fly Ash – Comparison of X-Ray Fluorescence Spectrometry and Standard Spectrophotometric Methods, *GeoScience Engineering*, 56, pp. 22-31
- Mineral Matter*, Kentucky Geological Survey, University of Kentucky, Lexington, University of Kentucky, Lexington, <https://www.uky.edu/KGS/coal/coal-mineral-matter.php>.
- Muchjidin, 2006, *Pengendalian Mutu dalam Industri Batubara*, penerbit ITB Press, Bandung.
- Muchtar Masjono,dkk. 2006. Penggunaan Zeolit Untuk Menyerap Ion Logam Nikel Pada Tanah pertambangan Di Sorowako. *Majalah Teknik Industri*. Sinar Pelangi, Makassar.
- Mulyatna, Lili. Dkk 2003. Pemilihan Persamaan Adsorpsi Isoterm Pada Penentuan Kapasitas Adsorpsi Kulit Kacang Tanah Terhadap Zat Warna Remazol Golden Yellow *Infomatek*. Volume 5 Nomor 3September 2003 : 131-140
- Mu'min B., 2002, *Penurunan zat organik dan warna pada pengolahan air gambut menggunakan membran ultrafiltrasi dengan aliran cross flow yang didahului dengan proses koagulasi/flokulasi dan adsorpsi karbon aktif*, Thesis ITB Bandung Teknik Lingkungan
- Munaf, E., 2004,*Penyerapan Ion Kromium dalam Air Limbah Oleh Biosorben Kulit Kacang dengan Pendeteksi Spektrofotometer Serapan Atom*, JurnalKimia Andalas, Jurusan Kimia Fakultas MIPA Universitas Andalas.
- Naresh, D.N., 2010, *Management of Ash Disposal*, Indian Geotechnical Conference, GEOTrendz December 16-18.
- Natasha, Sharifah. 2006. *Adsorption Study-Dye Removal Using Clay. Report*.Faculty of Chemical Engineering and Natural Resources. University College of Engineering and Technology Malaysia
- Ni'mah, Yatim Lailun dan Ita Ulfin. 2007. Penurunan Kadar Tembaga Dalam Larutan dengan Menggunakan Biomassa Bulu.
- Nicolette Rebecca H. 2005.*The Application of High Capacity Ion Exchange Adsorbent Material, Synthesized from Fly Ash and Acid Mine Drainage*
- Nurkhamim, Nursanto, E., Ilcham, A., Haryono,G., 2020, *Batubara Sebagai Campuran Pupuk Tanaman*, Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat UPNVY Press.
- Nursanto, E., Nurkhamim, Paradise, M., 2021, *Batubara dan Lingkungan*, Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat UPNVY Press.
- Oscik, J. 1882. *Adsorption*. England: Ellos Horwood
- Pradan, S., Muhanta, S., (2020), IOP Publishing, *A Method to Perform Float-and-Sink Test for Separation of Coal Samples of Various Densities and Determination of 'Probable Error' and 'Imperfection'* diakses pada 31 Juli 2023 dari <https://www.researchgate.net/>

[publication/343642565](https://www.researchgate.net/publication/343642565) A method to perform floatandsink_test_for_separation_of_coal_samples_of_various_densities_and_determination_of_Probable_Error_and_Perfection

Pratama Yoga. dkk. 2007. *Coal Fly Ash Conversion to Zeolite for Removal of Chromium and Nickel from Wastewaters*. (Online). www.majarikanayakan.com

Prijono, A., 1992, Pengertian Batubara, diakses pada 6 Agustus 2023 dari <https://www.ptba.co.id/berita/artikel/getting-to-know-coal-563#:~:text=4..>

Rahadja, H., (1990), *Produksi Teknologi Semen*, Padang, Indonesia Cement Institute.

Rakhman, A., (2020), *Prinsip Kerja Boiler*, diakses pada 17/07/2023 dari <https://rakhman.net/power-plants-id/prinsip-kerja-boiler/>

Restu, A., Wijayanto H., Effendi, F., Murwati, S., 2010, *Penurunan Kadar Phenol dengan Memanfaatkan Bagasse Fly Ash dan Chitin Sebagai Adsorben*, Diakses pada 5 Agustus 2023 dari <https://adoc.pub/penurunan-kadar-phenol-dengan-memanfaatkan-bagasse-fly-ash-d.html>

Reynolds, Tom D. (1982). *Unit Operations and Process in Environmental Engineering*. California: Texas A&M University, Brooks/Cole Engineering Division

Riadi, M., (2018). *Jenis, Bahan Baku dan Proses Pembuatan Semen*. Diakses pada 7/19/2023, dari <https://www.kajianpustaka.com/2018/12/jenis-bahan-baku-dan-proses-pembuatan-semen.html>

Road Map Pengembangan dan Pemanfaatan Batubara 2021 – 2045, Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara, diakses 20 Juli 2023 dari <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-buku-road-map-pengembangan-dan-pemanfaatan-batubara.pdf>.

Sahputra, (2019), *Rotary Kiln-Proses Praolahan*, Maroon Paper, diakses pada 20 Juli 2023 dari <https://maroonpaper.wordpress.com/2019/08/19/326/>

Santoso, J.I., Patrick, P., Andarias, Roy, S.K., 2003, *Pengaruh Penggunaan Bottom Ash Terhadap Karakteristik Campuran Aspal Beton*, Jurnal CED Vol. 5 No. 2 diakses dari: <https://ced.petra.ac.id/index.php/civ/article/view/15572>.

Setyowati, I., Hartono, Nurkhamim, 2013, *Pengaruh Kualitas Batubara Terhadap Kinerja Pullverizer untuk Persiapan Umpan Pembakaran Batubara di Boiler PLTU Suralaya*, Cilegon Banten, Prosiding Seminar Nasional, Prodi Teknik Pertambangan-FTM, UPN "Veteran" Yogyakarta.

Skousen, J et-al (1998). *Handbook of Technologies for Avoidance and Remediation of Acid Mine Drainage*, The National Mine Land Reclamation Centre, Morgantown, West Virginia.

Slamet, A dan Masduqi, A. 2000. Satuan proses DUE-Like Project ITS. Surabaya

- SNI 5012:2011, *Pedoman Pelaporan Sumberaya dan Cadangan Batubara*, Badan Standardisasi Nasional, diakses pada 6 Agustus 2023 dari <https://www.perhapi.or.id/doc/sni-5015.pdf>.
- Speigh, J.G., 2001, *Handbook of Petroleum Analysis*, John Wiley and Sons, Inc., New York, diakses pada 6 Agustus 2023 dari https://www.academia.edu/15636460/Handbook_of_petroleum_product_analysis_by_james_speight
- Srinivasan, A., Grutzech, M.W., 1999, *The Adsorption of SO₂ by zeolites synthesized from fly ash*, *Environ. Sci. Technol.* 33, 1464– 1469.
- Stumn W, and J.J. Morgan. 1996. *Aquatic Chemistry*. John Wiley and Sons. New York.
- Sukandarrumidi, (1995), *Batubara dan Gambut*, Cetakan Pertama, Gajah Mada University Press, Yogyakarta, 150 hal.
- Susilowati, dkk. 2000. Pemanfaatan Abu Layang Batubara sebagai Bahan Dasar Sintesis Zeolit dengan Metoda Reaksi Hidrotemal melalui Refluks HCL sebagai Perlakuan Awal. Prosiding Seminar Nasional Komia VIII. Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.
- Thiessen, R. 1974. *The Coal Thin – Section* Collection of the U.S. Geological Survey. USA: Geological Survey Bulletin, <https://pubs.er.usgs.gov/publication/b1432>
- Tukang Batu, 2015, *Sulfur Pada Batubara*, <http://www.tukangbatu.com/2015/11/tipe-tipe-sulfur-pada-batubara-sulfur.html>
- Ulfaty, R., (2018), *Pembuatan Semen Portland*, diakses pada 19/07/2023, dari <https://bptsugm.com/pembuatan-semen-portland/>
- Wahyuni, Suci, 2010, *Adsorpsi Ion Logam Zn (II) Pada Zeolite A Yag Disintetis Dari Abu Dasar Batubara PT. IPMOMI Paiton dengan Metode Batch*, Jurusan Kimia, FMIPA ITS, Surabaya
- Wang, S., Soudi, M., Li, L., and Zhu, Z. H., 2006, *Coal ash conversion into effective adsorbents for removal of heavy metals and dyes from wastewater*, *Journal of Hazardous Materials B*, 133, 243–251.
- Waranusantigul,P., Pokethitoyok P., Kruatachue, M., Upatham, S., 2003. *Kinetics of Basic Dye (Methilen Blue) Biosorption by Giant Duckweed (Spirodela Polyrhiza)*. *Environmental Pollution*, Vol. 1, No. 25, pp. 385-392.
- Webar, 1995. *Toxic Organic Chemicals in Porous Media*, Elsevier Ltd, Oxford, UK.
- Wiratama, C., 2020, *Coal Fired Boiler Power Plant*, diakses pada 17/07/2023 dari <https://www.aeroengineering.co.id/2020/02/boiler-dengan-bahan-bakar-batubara/http://duniagalery.blogspot.com/2015/06/kiln-proses-pembuatansemen.html>
- Zhang, B., Wu, D, Wang, C., He, S., Zhang, Z., and Kong, H., 2007, Simultaneous removal of ammonium and phosphate by zeolite synthesized from coal fly ash as influenced by acid treatment, *Journal of Environmental Sciences*, Volume 19, Issue 5, Pages 540-545

GLOSARIUM

A

- Adiabatik : proses yang terjadi pada suatu sistem apabila selama berlangsungnya proses tidak ada panas (kalor) yang masuk atau keluar.
- Aglomerasi : pengumpulan, dan/atau penumpukan partikel atau zat menjadi satu
- Alkali : hidroksida dari logam Li, Na, K, Rb, dan Cs.
- Alterasi : proses alam yang mengubah komposisi kimia mineral atau kristalografi.

C

- Clinker* : bahan utama dalam pembuatan semen yang dihasilkan dari proses pembakaran.
- Cone and quartering* : metode pengambilan contoh dengan membentuk sampel menjadi kerucut dan membaginya menjadi empat bagian.

D

- Daerah paralik : daerah pesisir.
- Dekomposisi : proses perubahan menjadi bentuk yang lebih sederhana; penguraian.
- Difusi : pencampuran gas atau zat cair di luar daya mekanik.

E

- Eksotermik : reaksi kimia yang terjadi dengan melepaskan energi panas.
- Estuari : muara sungai/ perairan pantai setengah tertutup tempat air laut bertemu dengan air tawar

F

- Fire grate* : komponen pada tungku pembakaran pada *boiler*.
- Fisiografis : cabang ilmu Geografi yang mempelajari suatu wilayah daerah atau negara berdasarkan segi fisiknya.

G

Gasifikasi : perubahan batu bara dan sebagainya menjadi bentuk gas yang mempunyai nilai kalori rendah, sedang, atau tinggi, bergantung pada proses yang diterapkan dan maksud penggunaannya.

I

Ignitibility : mudah terbakar.

Isotermal : perubahan gas pada suhu yang tetap dengan tekanan dan volume yang berubah.

K

Kalsinasi : proses pemanasan suatu benda hingga temperaturnya tinggi, tetapi masih di bawah titik lebur untuk menghilangkan kandungan yang dapat menguap.

Karbonisasi : perubahan bahan baku asal menjadi karbon berwarna hitam melalui pembakaran.

L

Lagun : berhubunga dengan sekumpulan air asin yang terpisah dari laut oleh penghalang yang berupa pasir, batu karang dan sebagainya.

M

Maseral : komponen organik terkecil penyusun batubara.

Metalurgi : ilmu yang mempelajari sifat-sifat kimia dari logam dan cara memanfaatkan logam untuk kegunaan sehari-hari.

O

Oksidasi : penggabungan zat dengan oksigen.

P

Paleografi : ilmu yang meneliti perkembangan bentuk tulisan atau tulisan kuno.

Panas laten : panas yang diserap oleh suatu badan atau sistem termodinamika selama proses dengan suhu konstan.

Pirit : mineral yang mengandung besi dan belerang.

Pirolisis : perubahan secara kimiawi yang terjadi karena panas.

Pozzolan : bahan yang mengandung senyawa silika atau silika alumina apabila dicampur air akan membentuk kalsium hidroksida

Pulverizer : alat untuk mengecilkan ukuran material.

R

Riffle : alat untuk pengambilan conto.

S

Salinitas : tingkat kandungan garam dan keasinan pada air, tanah atau zat cair lainnya.

Sedimen limnik : endapan yang terbentuk di rawa.

Sinter : proses pemanasan pada suhu tinggi pada material keramik yang bertujuan untuk menurunkan energi bebas.

Slag : limbah yang dihasilkan dari proses peleburan baja.

Slurry : campuran zat padat dan cair, berupa lumpur.

Stockpile : tempat penyimpanan komoditas/ bahan galian.

Struktur geologi : cabang ilmu geologi yang mempelajari struktur geologi hasil dari deformasi kerak bumi, penyebabnya, dan implikasinya terhadap sumberdaya dan kebencanaan

Syngas : singkatan dari sintetik gas, produk gasifikasi batubara dan aplikasi utamanya adalah pembangkit listrik.

T

Terak : produk sampingan atau ampas dari proses peleburan logam.

V

Viskositas : sifat atau ukuran kekentalan atau ketebalan fluida atau zat cair

INDEKS

- A**
- Adiabatik, 20
 - Aglomerasi, 34
 - Alkali, 34,35, 36, 47, 48, 49, 61
 - Alterasi, 6
- C**
- Clinker*, 22, 58, 62, 65, 66
 - Cone and quartering, 39
- D**
- Daerah paralik, 3
 - Dekomposisi, 3, 12, 13, 15, 17, 18, 37, 66
 - Difusi, 26
- E**
- Eksotermik, 71
 - Estuari, 4
- F**
- Fire grate, 48
 - Fisiografis, 3
- G**
- Gasifikasi, 15, 20, 26, 68, 70, 71, 72, 73
- I**
- Ignitibility, 70
 - Isotermal, 20
- K**
- Kalsinasi, 36, 58, 64, 65, 66, 67, 82
 - Karbonisasi, 16, 26, 73, 74, 75, 76
- L**
- Lagun, 1, 4
- M**
- Maserai, 6, 27
 - Metalurgi, 19, 44, 67, 75, 76
- O**
- Oksidasi, 3, 14, 18, 19, 27, 28, 35, 36, 49
- P**
- Paleografi, 1, 3
 - Panas laten, 20
 - Pirit, 4, 14, 17, 18, 19, 20, 31, 38, 38
 - Pirolisis, 15, 16, 26, 72, 73
 - Pozzolan, 58, 59, 60, 82, 83, 84, 85, 86
 - Pulverizer*, 24, 46, 47, 51
- R**
- Riffle*, 39
- S**
- Salinitas, 4, 31
 - Sedimen limnik, 3
 - Sinter, 34, 35, 65
 - Slag*, 14, 19, 22, 32, 33, 58, 84, 85
 - Slurry, 36, 61
 - Stockpile, 27
 - Struktur geologi, 1, 3, 8, 9, 10
 - Syngas, 68, 69 70, 71, 73
- T**
- Terak, 33, 34, 59
- V**
- Viskositas, 14, 33

Tentang Penulis



Nurkhamim lahir di Pati, Jawa Tengah. Menempuh pendidikan S1 Teknik Pertambangan UPN “Veteran” Yogyakarta pada tahun 1987-1994, kemudian melanjutkan pendidikan S2 bidang Rekayasa Pertambangan di Institut Teknologi Bandung pada tahun 1998-2001, dan pendidikan S3 Teknik Geologi Universitas Gadjah Mada pada tahun 2013-2018. Penulis aktif mengajar di Jurusan Teknik Pertambangan UPN “Veteran” Yogyakarta sejak tahun 1995, baik pada Program Sarjana maupun Program Magister Teknik Pertambangan, dan menjadi Ketua Kelompok Bidang Keahlian Eksplorasi Mineral dan Batubara. Pernah menjadi Kepala Laboratorium Pengeboran dan Peledakan (2006-2010) dan Kepala Laboratorium Geofisika Tambang (2020-2024). Di samping tugas utama sebagai dosen, penulis juga aktif sebagai konsultan, narasumber dan tenaga ahli baik di instansi pemerintah (BLH, BRIN dan KKP) maupun swasta dan pada berbagai pelatihan khususnya di bidang pertambangan.

E-mail: nurkhamim@upnyk.ac.id ; khamimyk@gmail.com



Dwi Poetranto Waloeyo Adjie menyelesaikan pendidikan S1 di Jurusan Teknik Pertambangan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta, Lulus tahun 1989. Sarjana S2 di Jurusan Teknik Pertambangan dengan spesialisasi batubara, Fakultas Teknologi Mineral, Institut Teknologi Bandung, Lulus tahun 1998. Sejak 1991 aktif mengajar di Jurusan Teknik Pertambangan, FTM, UPNVY, juga sebagai Tenaga Ahli di beberapa perusahaan pertambangan batubara dan mineral serta sebagai Konsultan di PT. Tri Buana Eka Karsa , Yogyakarta. Kegiatannya yang lain adalah sebagai pemerhati masalah lingkungan yang berkaitan dengan pertambangan, terutama untuk penambangan batuan. E-mail:

dwipoetrantota@upnyk.ac.id, dwipoetranto61@gmail.com



Jaka Purwanta menempuh pendidikan S1 Teknik Kimia UPN “Veteran” Yogyakarta pada tahun 1995 - 2000, kemudian melanjutkan pendidikan S2 Ilmu Lingkungan Universitas Negeri Sebelas Maret Surakarta pada tahun 2008 – 2010, dan pendidikan S3 Ilmu Lingkungan Universitas Negeri Sebelas Maret Surakarta pada tahun 2014-2019. Penulis aktif mengajar di Jurusan Teknik Lingkungan, UPN “Veteran” Yogyakarta. Penulis juga aktif dalam kegiatan profesional lingkungan sebagai konsultan lingkungan hidup yaitu penyusun dokumen AMDAL dan UKL-UPL sebagai Ketua Tim Penyusun AMDAL (KTPA), Auditor Lingkungan Hidup, dan Asesor kompetensi AMDAL pada Lembaga Sertifikasi Profesi Lingkungan Hidup dan Kehutanan Indonesia (LSP LHKI).

E-mail: jaka.purwanta@upnyk.ac.id; jakapurwanta76@gmail.com



Imelia Rizna Wardani lahir di Kota Magelang, Jawa Tengah pada 23 Desember 2000, merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Telah selesai menempuh studi S1 Teknik Pertambangan UPN “Veteran” Yogyakarta pada tahun 2019 – 2023. Selama masa studi, penulis aktif mengikuti kegiatan organisasi maupun kepanitiaan.

E-mail: newimeliawardani@gmail.com

Linkedin : www.linkedin.com/in/imelia-rizna-wardani

ISBN 978-623-389-289-6



Nurkhamim, Wardani, Adji, Purwanta

LPPM UPN "Veteran" Yogyakarta

Jl. SWK Jl. Ring Road Utara No.104, Ngropoh, Condongcatur, Kec. Depok, Kabupaten Sleman,
Daerah Istimewa Yogyakarta 55283

Copyright 2023