

Efisiensi Penambahan Bahan Bakar *Wood Pellet* di *Rotary Kiln* pada Pabrik Semen

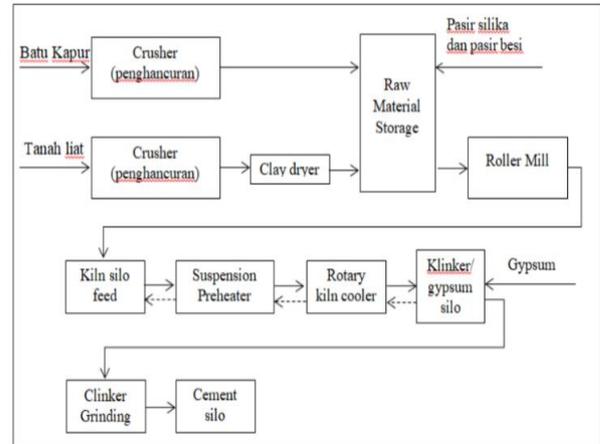
Dea Rastra Kemala, Anggun Vanisha Putri Kusuma Wardhani dan Agus Surono
 Departemen Teknik Kimia Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
 e-mail: agusz@chem-eng.its.ac.id

Abstrak—Industri semen merupakan salah satu industri yang berkembang sangat pesat seiring dengan pertumbuhan pembangunan di Indonesia. Meningkatnya permintaan semen terhadap pembangunan mempengaruhi meningkatkan permintaan kapasitas produksi yang dihasilkan industri semen. Penambahan kapasitas produksi berdampak terhadap pada ketersediaan bahan baku semen diantaranya batu kapur (*limestone*), tanah liat (*clay*), pasir besi (*iron sand*), dan pasir silika (*silika sand*). Dalam hal ini, Wonogiri memiliki sumber ketersediaan batu kapur yang tinggi terutama pada daerah Baturetno. Kapasitas produksi pabrik Semen yang akan didirikan yaitu 2.200.000 ton/tahun akan beroperasi secara kontinyu selama 24 jam/hari dan 300 hari/tahun. Proses pembuatan semen yang dipilih adalah proses kering. Proses kering meliputi proses persiapan bahan baku batu kapur dan tanah liat di *crusher* lalu dipecah oleh *hammer* dan melewati *clay cutter* sehingga terjadi *size reduction*. Selanjutnya tahap penggilingan awal yaitu bahan baku digiling dan dikeringkan dengan *raw mill* lalu lanjut ke tahap pembakaran dengan *raw meal* dialirkan ke *preheater* untuk melakukan kalsinasi, lalu diumpun ke proses pembakaran di kiln sehingga menghasilkan senyawa klinker yang kemudian didinginkan dalam *clinker cooler*. Tahap terakhir yaitu penggilingan akhir diumpun kedalam *ball mill* dengan bahan tambahan *gypsum* dan *fly ash* menjadi semen yang berukuran 325 mesh. Efisiensi yang dilakukan yaitu bahan bakar batubara disubstitusikan dengan bahan bakar biomassa *wood pellet* pada proses pembakaran di *rotary kiln* sehingga dapat membandingkan 2 kasus penurunan emisi CO₂ dan penurunan dampak pemanasan global: (1) penggunaan bahan bakar 100% batubara dan (2) penggunaan bahan bakar 60% batubara dan 40% *wood pellet*, serta untuk mengetahui perbandingan *cost* yang dibutuhkan untuk bahan bakar. Hasil analisa dampak penurunan emisi CO₂ dan pemanasan global pada kasus (2) mengalami penurunan sebesar 0,2290 ton CO₂-eq dan 0,0449 ton CO₂/TJ per hari. sedangkan hasil analisa *cost* bahan bakar yang dibutuhkan pada kasus (1) dan (2) terjadi penghematan sebesar Rp. 636.241.487 per hari.

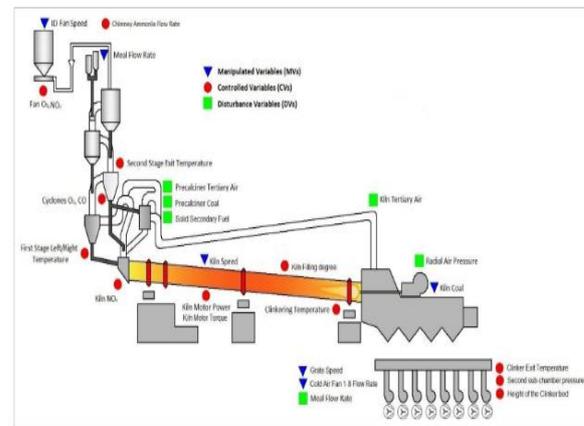
Kata Kunci—Batu Kapur, Fly Ash, Rotary Kiln, Wood Pellet, Semen.

I. PENDAHULUAN

INDUSTRI semen merupakan salah satu industri yang berkembang dengan pesat seiring dengan pertumbuhan pembangunan yang ada di Indonesia. Hampir semua pembangunan membutuhkan semen sebagai bahan untuk perekat. Pada umumnya terdapat beberapa jenis semen salah satunya adalah semen PCC (*Portland Composite Cement*) merupakan jenis semen varian baru dengan karakteristik mirip dengan semen pada umumnya tetapi, jenis semen ini memiliki kualitas lebih baik, serta ramah lingkungan dan memiliki harga yang jauh lebih ekonomis. Pada tipe PCC komposisi bahan bakunya terdiri dari tiga macam, yaitu : 70% sampai 90% *clinker* yang merupakan hasil dari olahan dari pembakaran batu kapur, pasir silika, pasir besi dan lempung, sekitar 5% dari *gypsum* sebagai zat memperlambat



Gambar 1. Diagram Alir Proses Produksi.



Gambar 2. Rotary Kiln.

pengerasan, dan zat tambahan yang berupa kapur (*Limestone*), abu terbang (*Fly Ash*). Semen PCC termasuk material ramah lingkungan karena dalam proses produksi PCC, penggunaan bahan bakar dapat berkurang sampai sekitar 20%, dengan menggunakan material komposit sebagai pengganti sebagian klinker; substitusi sebagian klinker dengan material komposit ini juga dapat mengurangi potensi emisi gas CO₂; PCC juga menggunakan waste material seperti slag dan fly ash sebagai komposit pengganti klinker; PCC diproduksi dengan teknologi penangkapan debu mutakhir, sehingga menekan potensi pencemaran udara jauh dibawah ambang batas yang telah ditentukan; Produksi PCC menggunakan sejumlah bahan bakar alternatif terbaru seperti *wood pellet*, serbuk gergaji, ban bekas dan lain-lain untuk menggantikan batu bara. PCC dirancang untuk daya tahan tinggi, tahan sulfat, panas hidrasi rendah dan impermeabilitas tinggi untuk mempertahankan daya tahan bangunan lebih lama. PCC dikemas dalam bahan tas yang dapat didaur ulang dan tidak mengandung racun berbahaya.

Tabel 1.
Perbandingan Proses Basah dan Kering

Kriteria Pertimbangan	Proses Basah	Proses Kering
Kandungan air pada raw material	Banyak (campuran berupa slurry)	Sedikit
Pasokan air di pabrik	Banyak	Sedikit
Biaya bahan bakar	Banyak	Sedikit
Power Supply	Banyak	Sedikit
Banyaknya debu yang diakibatkan	Sedikit	Banyak
Keseragaman campuran untuk umpan kiln	Baik	Kurang baik
Biaya produksi	Rendah	Tinggi

Tabel 2.
Perbandingan Bahan Baku Kayu untuk Wood Pellet

Variabel	SNI Standard	<i>Calliandra Calothyrsus</i>	<i>Gliricidia Sepium</i>	Sawdust
Diameter (mm)	-	6,43	6,37	6,41
Length (mm)	-	46,5	44,9	37,4
L/D	-	7,23	7,05	5,83
Moisture Content (%)	Maks 12	5,13	5,62	5,23
Particle Density (g/cm ³)	Min. 0,8	1,32	1,25	1,24
Bulk Density (kg/m ³)	-	739,2	633,6	624
Calorific Value (Cal/g)	Min. 4000	4387	4351	4206
Combustion Rate (gr/minute)	-	11,73	12,10	14,33

Tabel 3.
Reaksi yang Terjadi pada Preheater di Setiap Stage

Stage	Reaksi
I	$H_2O(l) \rightarrow H_2O(g)$
II	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O \rightarrow Al_2O_3 \cdot 2SiO_3 + 2H_2O$
III	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$
	$MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2$
<i>Calsiner</i>	$2CaO + SiO_2 \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2$

Tabel 4.
Reaksi yang Terjadi pada Rotary Kiln

Suhu (°C)	Reaksi
800-900 (Calcination Zone)	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$ $CaO + SiO_2 \rightarrow CaO \cdot SiO_2$ $CaO + Al_2O_3 \rightarrow CaO \cdot Al_2O_3$
900-1200 (Transition Zone)	$CaO \cdot SiO_2 + CaO \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2$ $2CaO + SiO_2 \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2$ $CaO \cdot Al_2O_3 + 2CaO \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3$ $3CaO \cdot Al_2O_3 + CaO + Fe_2O_3 \rightarrow 4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$
1200-1450 (Burning Zone)	$2CaO \cdot SiO_2 + CaO \rightarrow 3CaO \cdot SiO_2$
1450-1200 (Cooling Zone)	-

Produsen PCC menghargai kelestarian lingkungan terutama di wilayah pertambangan, revitalisasi lahan, pengelolaan sumber daya air, budidaya sumber energi terbarukan, dan pengelolaan keanekaragaman hayati di lingkungan pertambangan. Tingginya kebutuhan semen dan terbatasnya sumber energi tak terbarukan dan pemanasan global akibat gas rumah kaca mendorong industri semen untuk mencari sumber energi alternatif yang ramah lingkungan. Di sisi lain, diperlukan penanganan dan pemeliharaan limbah yang tepat dan aman (termasuk limbah biomassa) sesuai dengan jumlah limbah yang terus bertambah akibat meningkatnya aktivitas industri dan komersial serta tuntutan umum akan kualitas lingkungan. Salah satu upaya untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah pemanfaatan limbah sebagai sumber energi melalui co-processing yang memudahkan pengelolaan limbah dan mengamankan pasokan bahan bakar tak terbarukan. Proses produksi semen merupakan alternatif yang efisien untuk mengolah banyak limbah B3 dan non-B3 (biomassa) dengan cara yang ramah lingkungan dan hemat biaya [1]. Pada proses pembakaran, karbon dioksida (CO₂) yang terbentuk dari reaksi antara Karbon (C) dengan oksigen (O₂), kemudian besar kecilnya gas karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan ditentukan oleh nilai kalori dari bahan bakar selain itu udara dalam hal ini adalah oksigen (O₂), yang

dibutuhkan dalam pembakaran harus lebih besar dari kebutuhan stokiometri [2].

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Proses Produksi

Pada produksi semen terdapat 2 jenis proses yaitu proses basah (*wet process*) yaitu proses pembuatan semen dengan penambahan air pada proses penggilingan dan pencampuran dan proses kering (*dry process*) yaitu proses pembuatan semen yang pada proses penggilingan dan pencampuran tanpa penambahan air (Gambar 1) [3].

1) Proses Basah

Penggilingan bahan baku terdiri dari 2 tahap yaitu *primary crusher* dan *secondary crusher*. Setelah digiling, setiap jenis bahan baku disimpan di tempat yang terpisah. Bahan baku yang diumpukan ke dalam *grinding machine* sebelumnya melewati *weight feeder* untuk mengatur perbandingan berat bahan baku. Proses penggilingan disertai penambahan air ke dalam grinding mil berupa *slurry*. *Slurry* yang telah homogen dibakar untuk menghasilkan *clinker* lalu didinginkan di dalam *clinker cooler*. Bahan tambahan yang diperlukan adalah *gypsum* yang telah digiling menggunakan *grinding*

Tabel 5.
Perbandingan Kandungan Sulfur

Partikel	Sulfur (%)
Batubara	0,75%
Wood Pellet	0,01%

Tabel 6.
Faktor Emisi Bahan Bakar

Kasus	Fuel (ton)		Faktor Emisi
	Batubara	Wood Pellet	
1	0,062	0,000	1,89
2	0,037	0,011	1,5

mill, sehingga dihasilkan semen dalam bentuk bubuk dan siap dikemas [4].

2) Proses Kering

Proses kering diawali dengan pengecilan ukuran bahan baku menggunakan *crusher*. Penggilingan bahan baku terdiri dari 2 tahap yaitu *primary crusher* dan *secondary crusher*. Setelah digiling, setiap jenis bahan baku disimpan di tempat yang terpisah. Pada proses kering, *raw material* berupa batu kapur, tanah liat dan lain-lain dihancurkan tanpa penambahan air, dikeringkan dan digiling di dalam *grinding mill*. Kemudian dilakukan pencampuran kembali agar lebih homogen di dalam *blending silo* menggunakan sirkulasi udara yang kuat. Hasilnya berupa campuran abu insinerasi yang homogen untuk diumpukan ke kiln pembentukan *clinker* kemudian *clinker* yang panas tersebut harus didinginkan terlebih dahulu didalam *clinker cooler* sebelum dicampur dan digiling dengan *gypsum* di penggilingan akhir untuk menghasilkan semen dalam bentuk bubuk. Proses penyiapan *raw materials* dilakukan pada kondisi kering atau tanpa penambahan air, pada tahap pencampuran inilah yang membedakan proses kering dengan proses basah [5].

Perbandingan proses pembuatan semen komposit dari berbagai aspek dapat dilihat pada Tabel 1 maka akan dibuat pabrik semen komposit menggunakan proses kering. Kekurangan proses kering terletak pada campuran yang kurang seragam dan mengakibatkan banyak debu. Untuk meminimalisasi campuran yang kurang seragam, maka bahan-bahan yang akan dicampurkan harus dikecilkan membentuk bubuk terlebih dahulu dan mengatur kondisi operasi pada saat proses *blending*. Sedangkan untuk mengurangi debu yang ditimbulkan proses kering, maka proses dilengkapi dengan *Electrostatic Precipitator* untuk menangkap debu yang terikut pada udara yang akan dibuang [6].

B. Wood Pellet

Sumber energi terbarukan merupakan salah satu alternatif pengganti bahan bakar fosil (minyak bumi, gas dan batu bara). Salah satu alasannya adalah pengurangan SO_2 dan NO_x di atmosfer [4]. *Wood pellet* merupakan salah satu biomassa kayu yang dapat menjadi bahan bakar alternatif karena memiliki nilai kalor yang tinggi dan mampu mengurangi penggunaan energi fosil. Pemanfaatan energi terbarukan dari biomassa kayu yang diolah dalam bentuk *wood pellet* bersifat ramah lingkungan, berkelanjutan serta dapat mengurangi efek rumah kaca berupa emisi CO_2 dan pencemaran lingkungan [7]. *Wood pellet* dengan kualitas terbaik terbuat dari kayu kaliandra. *Wood pellet* jenis ini memiliki kalor sebesar 4387 kKal. Perbandingan bahan baku kayu untuk *wood pellet* dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 7.
Hasil Perhitungan Emisi CO_2

	Kasus 1	Kasus 2
	Q_F	0,06
NK	4,823	4,6486
FE	1,89	1,5
Emisi CO_2	0,563484993	0,33444394

Tabel 8.
Hasil Perhitungan Penurunan Dampak Global

	Kasus 1	Kasus 2
	Batubara	0,116832883
Wood Pellet	0	0,0163
Total	0,116832883	0,0719

Harga jual *wood pellet* lebih terjangkau bila dibandingkan dengan energi fosil batubara yang umum digunakan pada proses pembakaran. Berdasarkan data harga jual *wood pellet* sebesar 1 juta per ton atau sekitar USD \$67 per di Indonesia apabila dibandingkan dengan harga batu bara 4,6 juta per ton atau setara dengan USD \$308 di Indonesia, mampu menekan *cost* yang diperlukan dalam proses pembakaran di *rotary kiln* [8].

C. Rotary Kiln

Rotary kiln memainkan peran penting dalam hal konsumsi energi dan emisi, karena besarnya jumlah energi panas dan listrik yang diperlukan [9].

Rotary kiln adalah silinder yang panjang dan agak miring yang ditandai dengan bahan tahan api yang tahan terhadap suhu tinggi. Kiln berputar di sekitar sumbunya, memungkinkan campuran yang diproses bergerak di sepanjang sumbunya (Gambar 2). Pembakar di *kiln* menggunakan sedikit udara primer yang berasal dari *fan* utama dimana berfungsi sebagai pengumpan bahan bakar batu bara ke *kiln* Unit pembakaran (*Kiln*) merupakan unit terpenting dalam proses pembuatan semen. pada unit ini senyawa - senyawa penyusun semen seperti dikalsium silikat (C2S), trikalsium silikat (C3S), trikalsium aluminat (C3A), dan tetrakalsiumalumina ferit (C4AF) terbentuk [10].

D. Efisiensi Bahan Bakar

Efisiensi bahan bakar ialah manajemen energi, penghematan energi dan pengurangan konsumsi. Efisiensi bahan bakar didefinisikan sebagai rasio antara keluaran yang berguna dan jumlah masukan energi yang digunakan untuk menghasilkan produk yang dihasilkan [11]. Proses utama dalam industri pembuatan semen adalah proses pembakaran. Efisiensi energi pada kiln penting untuk diketahui. Produksi klinker di kiln yang terjadi pada suhu tinggi, juga akan melepaskan berbagai macam gas, seperti CO_2 . Karbon dioksida adalah termasuk sebagai salah satu gas rumah kaca, gas ini akan berdampak negatif terhadap ozon bumi [12]. Biaya bahan bakar batubara pada *rotary kiln* sangat tinggi dan kunjung naik selama 5 tahun terakhir. Menurut ICE Newcastle, harga batu bara pada tahun 2018-2023 berada di kisaran USD \$265 – USD \$308 per ton. Faktor permasalahan diatas dapat diatasi dengan memberi bahan bakar alternatif *wood pellets* dari kayu kaliandra sebanyak 40% yang memiliki kalor 4.387 kKal dan dicampurkan dengan bahan bakar batu bara sebanyak 60% yang memiliki kalor 4.823 kKal. Dengan ini bertujuan untuk mengurangi emisi karbon dan menekan *cost* [13].

Tabel 9.
Cost Bahan Bakar Pabrik Semen

Bahan Bakar		Kebutuhan (Ton)	Kasus 1	Kasus 2
100%	Batubara	453,32	Rp 2.088.955.678,32	
60%	Batubara	271,99		Rp 1.253.364.190,74
40%	Wood Pellet	199,35		Rp 199.350.000,00
Total			Rp 2.088.955.678,32	Rp 1.452.714.190,74

Tabel 10.
Energi Existing Batubara 100%

Masuk		Keluar	
Komponen	H (kkal)	Komponen	H (kkal)
Panas raw mix (H A13)	1.548.676.925	Panas clinker (H A14)	1.743.137.395
Q supply	2.190.441.402	panas gas buang	1.886.458.862
		Q loss	109.522.070
Total	3.739.118.327		3.739.118.327

E. Penentuan Rasio Substitusi Batubara

Dalam pembuatan semen, proses pembakaran klinker konvensional melibatkan sistem preheater suspensi empat tahap. Entalpi gas buang kiln adalah kerugian terbesar yang mencakup lebih dari 50% dari semua kerugian termal. Baik efisiensi termal. Terjadi substitusi bahan bakar fosil konvensional dengan bahan bakar alternatif batu bara dengan kayu pelet dapat menurunkan biaya dan energi. Peraturan lingkungan telah meningkatkan minat produsen semen di seluruh dunia untuk menilai kelayakan substitusi Kayu pelet. Optimalisasi pada *Rotary Kiln* selama substitusi sangat penting. Pemahaman tentang respons efisiensi energi sistem terhadap Kayu Pelet atau rasio substitusi diperlukan untuk mengoptimalkan sistem.

Untuk mengganti bahan bakar fosil dengan Kayu Pelet, terlebih dahulu harus menjalani pra pemrosesan yang melibatkan pengurangan kelembapan dan ukuran partikel selama pembakaran. Berdasarkan pembakaran pada kayu pelet, Kadar air dalam kayu pelet merupakan faktor yang sangat berpengaruh terhadap perilaku api, terutama dalam kecepatan pembakaran dan kemampuan terbakar dari kayu bakar. Dalam hal ini, semakin tinggi kadar air bahan bakar semakin banyak panas yang diperlukan untuk mengeluarkan air dari bahan bakar. Hasilnya, terjadi penurunan kecepatan pembakaran dan flamabilitas dari bahan bakar tersebut. Oleh karena itu, kadar air sering digunakan dalam prediksi perilaku api. Hubungan Penting untuk menentukan sifat fisik dan kimia bahan baku, bahan bakar (termasuk kayu pelet dan batu bara) serta nilai rasio klinker untuk meningkatkan optimalisasi rasio bahan bakar kayu pelet dan batu bara.

III. URAIAN PROSES

A. Proses Penyiapan Bahan Baku

Batu kapur yang telah ditambang berukuran 100 x 100 cm diumpangkna ke dalam primary crusher (C-110). crusher batu kapur ini dipecah oleh hammer yang berputar, sehingga terjadi size reduction menjadi 33 cm. Batu kapur berdiameter 33 cm diumpangkan ke dalam secondary crusher (C-120) menjadi 10 cm. Begitupun tanah liat yang sudah ditambang diumpangkan menuju clay cutter (C-130). Tanah liat yang berbentuk bongkahan melewati roll pada clay cutter sehingga

terjadi size reduction menjadi diameter 9 cm. Tanah liat dan batu kapur yang berdiameter 10 cm lalu dibawa belt conveyor menuju ke bin mix. Pasir silika diumpangkan ke bin pasir silika dan pasir besi diumpangkan ke bin pasir besi.

B. Tahap Penggilingan Awal

Proses pengolahan bahan di roller mill (C-210) material yang berupa pasir silika, pasir besi, dan limestone clay mix keluar dari binnya masing-masing kemudian ditimbang terlebih dahulu dengan weight feeder (J-211 A-C) baru diangkut oleh belt conveyor (J-212 A) menuju bucket elevator (J-213) untuk diumpangkan pada roller mill (C-210). Produk raw meal menuju cyclone (H-216) debu batu kapur, tanah liat, pasir silika, pasir besi dan gas melewati electrostatic precipitation (H-217). Material dari cyclone dan electrostatic precipitator dikirim dengan bucket elevator (H217) ke blending silo untuk dilakukan proses homogenisasi yang bertujuan memaksimalkan pencampuran dari raw meal dengan menggunakan teknik fluidisasi. Pada teknik fluidisasi, angin dihembuskan melewati raw meal yang berada di dalam silo. Raw meal yang sudah terfluidisasi berperilaku seperti liquid sehingga raw meal dapat bercampur.

C. Tahap Pembakaran

Preheater (B-313) yang berfungsi untuk memanaskan material menggunakan 4 stages. Raw meal masuk preheater pada suhu sekitar 200°C dan keluar pada suhu 800-850°C. Adapun reaksi yang terjadi pada *preheater* di setiap stage dapat dilihat pada Tabel 3.

Kiln material yang keluar dari Preheater (B-313) diumpangkan ke dalam rotary kiln (B-310) dengan suhu masuk 850°C dan keluar pada suhu sekitar 1350°C, Setelah mengalami proses kalsinasi awal pada suspension preheater, material masuk ke dalam rotary kiln untuk proses kalsinasi lanjutan dan pembakaran untuk terjadinya reaksi-reaksi yang akan membentuk produk semen. Sistem pembakaran rotary kiln yang digunakan adalah direct firing, dengan menggunakan bahan bakar berupa batubara dan *wood pellet* hasil penggilingan di coal mill. Adapun suplai udara primer sebagai syarat pembakaran berasal dari primary air fan dan udara sekunder yang berasal dari gas buang cooler. Pada rotary kiln dibagi menjadi empat zona dengan reaksi yang

Tabel 11.
Penggunaan Energi Modifikasi 60% Batubara

Masuk		Keluar	
Komponen	H (kkal)	Komponen	H (kkal)
Panas raw mix (H A13)	1.548.676.925	Panas clinker (H A14)	734.904.350
Q supply	319.086.973	panas gas buang	1.067.146.307
		Q loss	65.713.242
Total	1.867.763.898		1.867.763.898

Tabel 12.
Penggunaan Energi Modifikasi 40% Wood Pellet

Masuk		Keluar	
Komponen	H (kkal)	Komponen	H (kkal)
Panas raw mix (H A13)	1.548.676.925	Panas clinker (H A14)	728.504.563
Q supply	303.569.803	panas gas buang	1.084.985.746
		Q loss	38.756.419
Total	1.852.246.728		1.852.246.728

terjadi di setiap zona. Reaksi yang terjadi pada *rotary klin* dapat dilihat pada Tabel 4.

Clinker panas yang keluar dari rotary kiln (B-310) bersuhu kurang lebih 1200°C masuk ke dalam clinker grate cooler (E-314) untuk didinginkan secara mendadak (*quenching*) agar dihasilkan terak yang mudah digiling pada penggilingan akhir di *cement mill*. Clinker didinginkan secara mendadak dalam *clinker cooler type grate cooler*. *Grate cooler* ini mempunyai sembilan kompartemen. Sebagai media pendingin digunakan udara yang dihasilkan oleh 5 buah fan dan dihembuskan ke dalam undergate cooler atau kompartemen untuk mendinginkan clinker sampai 80°C. clinker yang dihasilkan pada cooler menjadi dua bagian yaitu bagian kasar akan jatuh chain conveyor (J-315 A) menuju ke clinker silo dan bagian halus akan dipisahkan dengan debu menggunakan cyclone (H-317), debu udara panas menuju raw mill.

D. Tahap Penggilingan Akhir

Clinker disimpan sementara di clinker dome (F-316) lalu ditransportasikan menuju roller press (C-317) untuk digiling dan disimpan dalam clinker bin. Proses penyiapan bahan aditif gypsum dan fly ash yang disimpan pada bin masing-masing lalu akan ditimbang menggunakan weight feeder yang akan diteruskan untuk digiling kembali menggunakan ball mill (C-410) untuk menghasilkan semen kasar. Semen kasar yang berukuran 0,55 mm akan disaring menggunakan vibrating screen (H-416). Semen yang belum berukuran 325 mesh akan di recycle menuju ball mill untuk digiling kembali hingga semen berukuran 325 mesh. Kemudian produk semen yang dialirkan melalui air slide diumpankan menuju packer untuk dikemas.

IV. EFISIENSI DAN OPTIMASI

Selama proses pembuatan semen, CO₂ dihasilkan dari tiga sumber: pembakaran bahan bakar dalam rotary kiln untuk mempertahankan suhu tungku yang diperlukan, dekarbonasi batu kapur dalam rotary kiln, dan penggunaan listrik di instalasi seperti pabrik penggilingan [14].

Menurut Cembureau (2015), sebanyak 0,83 ton CO₂ dikeluarkan per ton produk semen dengan faktor klinker 80 persen. Emisi tersebut terdiri atas emisi CO₂ dari kalsinasi sebanyak 0,45 ton, emisi CO₂ dari pembakaran batu bara sebanyak 0,28 ton, dan CO₂ dari pembangkit listrik untuk keperluan operasional sebanyak 0,1 ton CO₂ ekuivalen. Dari

tiga sumber, dekarbonasi batu kapur menghasilkan 60% dari emisi CO₂ yang dikeluarkan dari kiln semen [14].

Ada tiga strategi utama yang digunakan dalam industri semen yang dapat mengurangi emisi CO₂ yaitu dengan meningkatkan efisiensi penggunaan energi dalam proses pembuatan semen, mengganti penggunaan bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama pembakaran dalam kiln dengan bahan bakar alternatif yang berasal dari limbah atau produk sampingan, serta mengubah komposisi semen dengan menaikkan kadar aditif sehingga diperlukan energi yang lebih sedikit dalam memproduksi semen maupun *clinker* semen.

Berdasarkan uraian diatas kami melakukan optimasi dan efisiensi untuk membandingkan penggunaan energi pada produksi semen, yaitu melalui penggunaan batubara 100% dan yang telah disubstitusi dengan bahan bakar alternatif/ biomassa (*wood pellet*) pada *co-processing*, sehingga dapat dilihat bahan bakar yang paling optimum dan efisien, terlebih agar emisi CO₂ terkendali dan mengetahui pengaruh dampak penurunan global serta untuk membandingkan cost yang diperlukan apabila menggunakan bahan bakar 100% batubara dan yang telah dicampur dengan bahan bakar *wood pellet*.

A. Dampak Penurunan Emisi CO₂ dan Pemanasan Global

Karakteristik dari *wood pellet* yang digunakan sebagai pengganti dari batubara secara parsial, campuran dari batubara dan *wood pellet* diketahui bahwa dapat dibakar secara bersama-sama pada kebutuhan. Hasil pembakaran antara *wood pellet* dan batubara dapat menurunkan jumlah emisi CO, NO₂, NO_x, dan SO₂ lebih rendah dibandingkan dengan hanya menggunakan bahan bakar 100% batubara. Penurunan emisi terjadi karena kandungan sulfur dari biomassa *wood pellet* cenderung lebih rendah dibandingkan dengan batubara (Tabel 5) [15].

Proses pembakaran bahan bakar dan kalsinasi pada unit kiln merupakan proses utama yang menyumbang emisi gas rumah kaca pada produksi semen. Rataan nilai emisi gas rumah kaca per ton semen dunia sebesar 0,77 ton CO₂-eq per ton semen dengan rentang nilai antara 0,65-0,92 ton CO₂-eq per ton-semen. Dalam perhitungan beban emisi yang dihasilkan dari proses pembakaran, diperlukan data aktivitas berupa data konsumsi bahan bakar [14].

Clean Development Mechanism (CDM) merupakan proyek kegiatan yang bertujuan untuk menurunkan emisi gas rumah kaca di negara berkembang sehingga bisa mendapatkan kredit Certified Emission Reduction (CER).

Kredit CER ini dapat dipertukarkan, diperdagangkan, atau digunakan oleh negara industri berkembang sehingga bisa menncapai target penurunan emisi gas rumah kaca yang tertera dalam Kyoto Protocol [14].

Kebutuhan bahan bakar untuk 1 ton semen: Biomassa *wood pellet* memiliki kalor yang terkandung oleh 1 ton wood pellet yaitu 4,387 kKal, sedangkan 1 ton batubara (4,823 kKal) dapat diganti dengan *wood pellet* sebanyak 1,10 ton. Dengan ini pada kasus 1 (Data CDM 2022) diperlukan bahan bakar batubara 0,62 ton. Untuk kasus 2 (Data ASI 2020), diperlukan bahan bakar batubara 0,037 ton dan biomassa *wood pellet* 0,011 ton. Faktor emisi bahan bakar dapat dilihat pada Tabel 6.

Berdasarkan data pada Tabel 10 dapat dihitung emisi karbon dioksida yang dihasilkan perhitungan emisi pembakaran kasus 1 (bahan bakar 100% batubara.) dan kasus 2 (bahan bakar 60% batubara dan 40% *wood pellet*) dengan rumus:

$$Emisi CO_2 = QF \times NK \times FE$$

Keterangan:

QF = Konsumsi bahan bakar (ton)

NK = Nilai kalor bersih (kKal/ton)

FE = Faktor Emisi

Untuk menghitung emisi CO₂ dapat menggunakan perhitungan pada persamaan diatas, Hasil perhitungan emisi CO₂ dapat dilihat pada Tabel 7.

Dari persamaan diatas didapatkan hasil emisi dari penggunaan bahan bakar batubara 100% (kasus 1) yaitu sebesar 0,5634 ton CO₂-eq, sedangkan pada penggunaan bahan bakar 60% batubara dan 40% *wood pellet* (kasus 2) menghasilkan emisi sebesar 0,334 ton CO₂-eq. Hal ini membuktikan bahwa penggunaan substitusi bahan bakar batubara menggunakan biomassa *wood pellet* dapat menurunkan emisi CO₂ sebesar 0,2290 ton CO₂-eq. Presentase penambahan biomassa yang digunakan seperti penambahan *wood pellet* apabila semakin banyak *wood pellet* digunakan maka kandungan polutan dari HC, CO dan NO_x akan semakin berkurang dan menurunkan tingkat polusi udara [16].

Sedangkan untuk menghitung penurunan dampak pemanasan global (PGD) dapat menggunakan rumus:

$$PDG = \text{Kebutuhan Biomassa} \times \text{Faktor Emisi}$$

berdasarkan persamaan diatas didapatkan data dampak penurunan pemanasan global yang dapat dilihat pada Tabel 8.

Dari Tabel 9 dapat diketahui nilai penurunan dampak pemanasan global (PDG) dengan mengalihkan penggunaan biomassa (*wood pellet*) dan faktor emisi dan diperoleh hasil sebesar 0,044 ton CO₂-eq. Hal ini disebabkan karena biomassa yang memiliki karakteristik karbon yang netral dan ramah lingkungan dikarenakan produk utama karbon dioksida telah bebas selama melakukan proses pembakaran karena berasal dari fotosintesis tanaman. Penggunaan batubara sebagai bahan bakar meningkatkan gas rumah kaca (GRK) yang terkait secara langsung dengan pemanasan global. Penambahan *wood pellet* sebagai biomassa bahan bakar campuran batubara dapat menegah peningkatan emisi gas rumah kaca (GRK) yang terkait langsung dengan pemanasan dan dapat dijadikan sebagai energi baru yang digunakan sebagai bahan bakar campuran antara *wood pellet*

dan batubara [7]. *Wood Pellet* merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang dapat menghasilkan energi dan dapat mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK). Salah satu keuntungan penggunaan dari biomassa sebagai bahan bakar fosil yang dapat mengurangi emisi gas rumah kaca, *wood pellet* yang memiliki sifat karbon netral yaitu karbon yang dilepaskan ke atmosfer adalah hasil dari fotosintesis yang digunakan kembali [6].

B. Cost yang Dibutuhkan untuk Bahan Bakar

Pada pabrik semen berkapasitas 7.333.333 kg/hari, jika bahan bakar yang digunakan 100% batubara massa yang dibutuhkan sebanyak 453,32 ton/hari, sedangkan jika yang digunakan 60% batubara dibutuhkan sebanyak 271,99 ton/hari dan 40% *wood pellet* sebanyak 199,35 ton/hari. Saat ini harga batubara di pasaran mencapai Rp. 4.608.126/ton dan *wood pellet* dibandrol dengan harga Rp. 1.000.000/Ton.

Pada Tabel 9 dapat dilihat bahwa terjadi penurunan cost kebutuhan bahan bakar pabrik semen dimana kasus 1 dengan menggunakan bahan bakar 100% batubara membutuhkan cost Rp 2.088.955.678,32 (Tabel 10) dan kasus 2 dengan menggunakan bahan bakar 60% batubara (Tabel 11) dan 40% *wood pellet* membutuhkan cost sebesar Rp. 1.452.714.190,74 (Tabel 12). Hal ini menunjukkan adanya penghematan cost dilihat dari kasus 1 dan 2 selisih yang didapatkan sebesar Rp. 636.241.487,58.

Dari Tabel 9 dapat diketahui nilai penurunan dampak pemanasan global (PDG) dengan mengalihkan penggunaan biomassa (*wood pellet*) dan faktor emisi dan diperoleh hasil sebesar 0,044 ton CO₂-eq. Hal ini disebabkan karena biomassa yang memiliki karakteristik karbon yang netral dan ramah lingkungan dikarenakan produk utama karbon dioksida telah bebas selama melakukan proses pembakaran

V. KESIMPULAN/RINGKASAN

Berdasarkan efisiensi yang telah dilakukan membuktikan bahwa pada pabrik semen Portland Composite Cement (PCC) dengan kapasitas Rp2.200.000 ton/ tahun dengan bahan bakar batubara yang telah disubstitusikan dengan biomassa *wood pellet* membuktikan dapat menurunkan emisi CO₂ dan pemanasan global pada sehingga mengalami penurunan sebesar 0,2290 ton CO₂-eq dan 0,0449 ton CO₂/TJ per hari. Selain itu, jika dihitung cost kebutuhan bahan bakar yang telah disubstitusikan dengan biomassa *wood pellet* dapat menghemat biaya sebesar Rp. 636.241.487/ hari. Selain itu didapatkan penggunaan energi menurun saat modifikasi batu bara 60% dan kayu pelet 40%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Istighfar, A. Kurniawandy, and E. Ermiyati, "Analisa perbandingan kuat tekan beton semen PCC dan semen tipe 1 terhadap pemakaian sikament NN," *J. Online Mhs. Fak. Tek.*, vol. 1, no. 1, 2014.
- [2] A. Maryoto, "Pengaruh penggunaan high volume fly ash pada kuat tekan mortar," *J. Tek. Sipil Perenc.*, vol. 10, no. 2, 2008.
- [3] D. W. Prasetya and B. R. Junianto, *Semen PCC Dengan Pemanfaatan Pasir Besi*. Surabaya: Departemen Teknik Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2019.
- [4] R. R. Nur, F. D. Hartanti, and J. P. Sutikno, "Studi awal desain pabrik semen portland dengan waste paper sludge ash sebagai bahan baku alternatif," *J. Tek. ITS*, vol. 4, no. 2, 2015.
- [5] M. F. Wibiseno and Zulaikah, *Pabrik Semen Portland Pozzolan Menggunakan Proses Kering*. Surabaya: Departemen Teknik Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2018.

- [6] M. Holubcik, J. Jandacka, R. Nosek, and J. Baranski, "Particulate matter production of small heat source depending on the bark content in wood pellets," *Emiss. Control Sci. Technol.*, vol. 4, no. 1, 2018.
- [7] I. Gunawan, N. Muharyani, and C. Hendrasetiafitri, "Reducing the Ash Content of *Gliricidia* (*Gliricidia Sepium*) and *Calliandra* (*Calliandra Calothyrsus*) Wood Pellets through Debarking and Mixing with *Acacia* (*Acacia mangium*) and Pines (*Pinus merkusii*) Wood," *Int. Conf. Biomass Bioenergy*, 2022.
- [8] Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, *Harga Jual Batubara Untuk Pemenuhan Kebutuhan Bahan Baku/Bahan Bakar Industri Semen dan Pupuk di Dalam Negeri*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2021.
- [9] P. A. Alsop, *The Cement Plant Operations Handbook for Dry-Process Plants*, 7th ed. Dorking: Tradeship Publications Ltd, 2019.
- [10] S. . Deolalkar, *Designing Green Cement Plants*, 1st ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015, ISBN: 0128034203.
- [11] H. Sarjono, "Model pengukuran produktivitas berdasarkan pendekatan rasio output per input," *J. Winners*, vol. 2, no. 2, 2001.
- [12] F. R. Mutiara and H. Hadiyanto, "Evaluasi efisiensi panas dan emisi gas rumah kaca pada rotary kiln pabrik semen," *J. Ilm. Bid. Ilmu Kerekayasaan*, vol. 34, no. 1, 2013.
- [13] J. Picot, "Definition and implementation of an energy metering plans for energy efficiency," *Eng. Technol. J.*, vol. 8, no. 4, 2023.
- [14] A. Z. Nugraha, E. I. Wiloso, and M. Yani, "Pemanfaatan serbuk gergaji sebagai substitusi bahan bakar pada proses pembakaran - kiln di pabrik semen dengan pendekatan life cycle assesment (LCA)," *J. Pengelolaan Sumberd. Alam dan Lingkung.*, vol. 8, no. 2, 2018.
- [15] A. Artiningsih, "Studi penentuan kandungan sulfur (sulphur analysis) dalam batubara dan kayu palet," *J. Geomine*, vol. 2, no. 1, 2015.
- [16] Z. Arifin, A. Amrul, and I. Muhammad, "Simulasi co-combustion batubara dan biomassa tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (torrefied biomass)," *J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 10, no. 1, 2021.