

PENGARUH PENGGUNAAN BATU BASALT LAMPUNG DAN BATUBARA DALAM BAHAN BAKU TERHADAP KARAKTERISTIK KLINKER

THE EFFECT OF THE USE OF BASALT STONE FROM LAMPUNG AND COAL IN RAW MATERIAL ON CLINKER CHARACTERISTIC

Suharto^{*1}, Muhammad Amin¹, Muhammad Al Muttaqii¹, Syafridi² dan Kiki Nurwanti²

¹Balai Penelitian Teknologi Mineral – Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), Jl. Ir. Sutami Km. 15
Tanjung Bintang, Lampung Selatan, Indonesia

²Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung, Jl. Prof. Dr. Soemantri Brojonegoro No.1 Gedung
Meneng, Bandar Lampung 35145, Lampung, Indonesia

Diterima: 21 April 2020

Direvisi: 13 Mei 2020

Disetujui: 29 Juni 2020

ABSTRAK

Batu basalt Lampung telah diuji potensinya sebagai pengganti sebagian bahan baku utama pembuatan klinker semen. Batu basalt tersebut memiliki mineral-mineral dalam fase *anorthite*, *augite*, dan *albite* yang diperlukan pada pembentukan klinker. Pada penelitian ini, bahan baku utama adalah batu kapur 80%, pasir silika 10%, tanah liat 9% dan pasir besi 1%. Campuran bahan baku klinker adalah 90% atau 80% bahan baku utama dan 10% atau 20% batu basalt. Efek penambahan batubara ke dalam bahan baku klinker juga dipelajari untuk melihat kemungkinan kenaikan temperatur klinkerisasi di dalam campuran bahan baku, dan sekaligus untuk melihat efek abu batubara terhadap komposisi klinker. Klinker hasil pemanasan bahan baku pada temperatur 1100°C memiliki LSF 94,1% dan 95,1% (lama pemanasan 1 dan 3 jam). Jika pemanasan dilakukan pada 1200°C, klinker memiliki LSF 97,7% dan 98,00% (lama pemanasan 2 dan 3 jam). Tergantung pada temperatur dan lama pemanasan, klinker hasil percobaan ini umumnya memiliki SM 2,18-2,40%, dan AM antara 0,78-1,80%. Karakterisasi dengan XRD menunjukkan bahwa klinker terdiri dari fase *larnite* dan *gehlenite*, dan didominasi CaO.

Kata kunci: pemanfaatan batu basalt, karakterisasi klinker, temperatur pemanasan, penambahan batubara

ABSTRACT

Experimental study on the use of basalt stone originated from Lampung has been conducted to evaluate its potential for a partial substitute of raw material in production of cement clinker. The basalt stone contains minerals of anorthite, augite, and albite phases that are required for clinker formation. In this study, the main raw materials were 80% limestone, 10% silica sand, 9% clay and 1% iron sand. The raw material in these experiments were mixtures 90% or 80% of the main raw material and 10% or 20% of basalt stone. The effect of adding coal to raw materials was also studied to see the possibility of an increase in clinkerization temperature inside the raw material mixture, and at the same time to see the effect of coal ash on clinker composition. Clinker obtained from heating of raw materials at a temperature of 1100°C had LSF of 94.1% and 95.1% (heating time of 1 and 3 hours). If heating is carried out at 1200°C, the clinker had LSF of 97.7% and 98.0% (heating time of 2 and 3 hours, respectively). Depending on the temperature and duration of heating, the clinker mostly had SM in the range of 2.18-2.40% , and AM in the range of 0.78-1.80%. Characterization using XRD showed that the clinker consisted of larnite and gehlenite phases, and dominated by CaO.

Keywords: utilization of basalt stone, clinker characterization, heating temperature, addition of coal

*Corresponding author :

Email: harto_berg@yahoo.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.37209/jtbbt.v10i1.167>

PENDAHULUAN

Produksi klinker untuk pembuatan semen adalah proses yang kompleks karena banyaknya komponen dan fase dalam proses pembuatannya. Bahan baku pembuatan klinker adalah batu kapur, pasir silika, tanah liat dan pasir besi, dengan penggunaan batu kapur antara 75-90% [1]. Dengan bahan baku dari berbagai sumber, kualitas klinker semen harus dikontrol agar tetap memenuhi standar. Kualitas semen dinyatakan dengan parameter: *Lime Saturation Factor* (LSF), *Silica Modulus* (SM), *Alumina Modulus* (AM), *Tricalcium Silicat* (C_3S), *Dicalcium Silicat* C_2S , *Tricalcium Aluminate* (C_3A) dan *Tetracalcium Aluminoferrite* (C_4AF). Parameter-parameter ini diperoleh dari analisis *X-Ray Fluorencence* (XRF) [2].

Penggunaan batu kapur untuk produksi semen mencapai 87,4% dari konsumsi totalnya sebesar 5.047.263 ton. Karena itu, saat ini telah banyak penelitian yang ditujukan untuk mencari bahan baku alternatif agar produksi semen tetap berjalan dengan baik pada masa mendatang [3].

Batu basalt skoria dapat dijadikan sebagai bahan baku pengganti yang ditambahkan untuk mengurangi konsumsi batu kapur dalam proses produksi semen tipe I dan tipe PCC. Penggunaan batu basalt skoria sebanyak 1-10% sebagai bahan tambahan untuk produksi semen tipe I yang memenuhi SNI 15-2049-2004 dan tipe PCC sesuai dengan SNI No. 7064-2004. Uji kuat tekan maksimum semen tipe-I, 394 kg/cm² dapat dihasilkan dari penambahan batu basalt 3%. Batu basalt skoria dinyatakan memiliki potensi sebagai bahan baku klinker dan juga mengurangi konsumsi energi pada proses produksi klinker [4]. Selain batu basalt, ada beberapa batuan yang dapat digunakan sebagai bahan baku pengganti membuat produk klinker seperti *feldspar*, *tras*, dan *slag*.

Semen adalah bahan pengikat yang berbentuk serbuk halus. Jika dicampur dengan air, semen mengalami reaksi hidrasi dan mengikat bahan-bahan padat lainnya menjadi satu kesatuan massa yang kokoh. Bahan baku utama semen adalah oksida kapur ($CaCO_3$), oksida silika (SiO_2), oksida alumina (Al_2O_3), dan oksida besi (Fe_2O_3). Komponen CaO dan SiO_2 memberi pengaruh terhadap kuat tekan semen. Komponen Al_2O_3 dan Fe_2O_3 dapat menurunkan temperatur *sintering* pada proses pembentukan klinker.

Batu basalt hingga saat ini belum dimanfaatkan secara maksimal. Ketersediaan batu basalt skoria di Provinsi Lampung mencapai 338 juta m³ yang tersebar di berbagai kabupaten [5]. Pemanfaatan batu basalt ini masih terbatas oleh penduduk setempat sebagai bahan fondasi rumah tinggal.

Mengingat ketersediaannya di Lampung dan pemanfaatannya masih rendah, penelitian dan pengembangan pemanfaatan batu basalt dalam produksi klinker semen sangat perlu dilakukan. Di samping batu basalt, batubara lokal juga tersedia di beberapa lokasi di Lampung. Penelitian ditujukan untuk mengkaji potensi pemanfaatan batu basalt sebagai bahan baku substitusi batu kapur dalam pembuatan klinker, serta pemanfaatan batubara sebagai bahan bakar.

BAHAN DAN METODE

Penelitian pembuatan klinker dilakukan pada skala laboratorium, dengan bahan baku: batu kapur, pasir silika, tanah liat, pasir besi, serta penambahan batu basalt dan batubara. Bahan baku klinker adalah campuran batu kapur, pasir silika, tanah liat, pasir besi dan batu basalt (Tabel 1). Bahan-bahan baku tersebut dijadikan serbuk dengan menggunakan *ball mill* selama kurang lebih 8 jam.

Tabel 1. Komposisi Bahan Baku Klinker Semen

Komponen:	Komposisi, Fraksi Massa (%)		
	Campuran-I, Utama	Campuran-II	Campuran-III
batu kapur	80	70	60
pasir silika	10	10	10
tanah liat	9	9	9
pasir besi	1	1	1
batu basalt	-	10	20
		kode bahan baku	
tanpa batubara	90-10-00	80-20-00	
dengan batubara	90-10-20		

Catatan:

- batubara ditambahkan 20% ke dalam campuran II
- batubara terbakar dan meninggalkan abu

Tiga macam bahan baku adalah sebagai berikut (komposisi disajikan pada di Tabel 1).

- Campuran-II yang dibuat dari: 90% campuran-I dan 10% batu basalt, tanpa batubara; kode 90-10-00-xxxx (xxxx: temperatur pemanasan pada 1100 atau 1200°C).
- Campuran-III: 80% campuran-I dan 20% batu basalt, tanpa batubara; kode 80-20-00-xxxx

c. Campuran-IIIa: 80% campuran-I dan 20% batu basalt, dan ditambah batubara sebanyak 20% massa campuran-III; kode 80-20-20-xxxx.

Serbuk bahan baku dijadikan pelet dengan ukuran 0,8–1,2 cm. Pelet ini dibiarkan dahulu pada temperatur kamar selama 24 jam. Reaksi pembentukan klinker dilaksanakan dengan cara pemanasan bahan baku di dalam *muffle furnace* pada temperatur 1100°C dan 1200°C [6]. Pemanasan dilakukan selama 1, 2, atau 3 jam [7].

Karakterisasi bahan baku dan klinker hasil pemanasan (klinkerisasi) meliputi analisis XRF (dengan PANalytical ϵ psilon3^{XLE}) dan analisis XRD (dengan PANalytical X'Pert³ Powder). Parameter sifat klinker yang dikaji adalah (sesuai dengan ASTM C150): LSF, SM, AM, C₃S, C₂S, C₃A, dan C₄AF (diuraikan lebih lanjut pada pasal hasil dan diskusi).

Penelitian dilaksanakan di *Laboratorium Analisis Kimia dan Laboratorium Non-Logam*, Balai Penelitian Teknologi Mineral, LIPI, Jl. Ir. Sutami km 15, Tanjung Bintang, Lampung Selatan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kandungan Mineral Bahan Baku Klinker

Kandungan mineral bahan-bahan baku klinker semen disajikan pada Tabel 2. Jumlah kadar SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O₃ batu basalt mencapai 79,29%. Berdasarkan ASTM C618 disyaratkan, pozzolan alam atau semen tipe N memiliki kandungan SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O₃ minimal 70% [8]. Jadi batu basalt Lampung memiliki potensi sebagai material pengganti bahan baku klinker dan pozzolan.

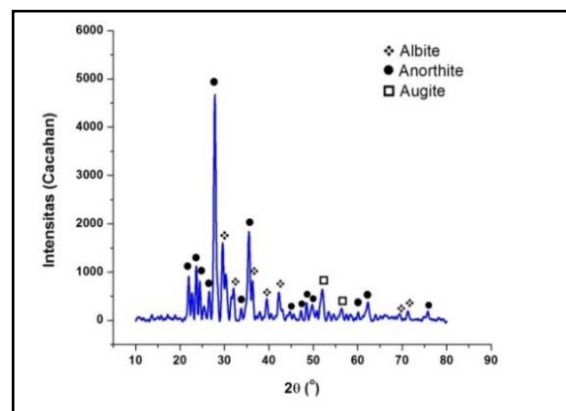
Tabel 2. Kandungan Mineral Bahan Baku Klinker (Hasil XRF)

No.	Sebagai Oksida	Batu Basalt	Abu Batubara	Batu Kapur	Pasir Silika	Pasir Besi	Tanah Liat
1	SiO ₂	47,38	57,06	4,04	95,29	18,78	53,81
2	Al ₂ O ₃	18,92	25,93	1,65	3,17	6,34	27,49
3	Fe ₂ O ₃	12,99	5,25	0,35	0,40	58,03	15,60
4	CaO	10,98	5,03	92,97	0,84	3,13	0,22
5	MgO	4,45	3,37	0,40	-	4,82	0,37
6	Na ₂ O	2,87	1,26	-	-	-	-
7	TiO ₂	1,35	0,82	0,11	0,13	6,70	1,39
8	K ₂ O	0,59	0,50	0,10	-	0,27	0,88
9	MnO	0,15	0,39	-	-	0,51	-
10	SO ₃	-	-	-	-	0,56	-
11	loss of ignition	0,33	0,38	0,18	0,15	0,42	0,25

Penelitian Rawas, dkk. juga menyatakan bahwa bahan baku dengan kandungan SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O₃ lebih dari 50% umumnya merupakan bahan pozzolan yang baik dan memiliki aktivitas pozzolan yang tinggi untuk dapat digunakan sebagai material substitusi semen [9]. Jadi batu basalt yang digunakan dalam penelitian ini memiliki potensi sebagai bahan baku pembuatan klinker semen.

Karakterisasi Batu Basalt Menggunakan XRD

Batu basalt dalam penelitian ini didominasi oleh kelompok mineral dengan fase *anorthite*, pada puncak tertinggi terletak pada 2θ = 28,04° (Gambar 1), serta puncak tinggi berikutnya pada 2θ = 35,00°. Fase ini adalah kelompok mineral *plagioclase* atau *feldspar* dengan rumus kimia *Calcium Aluminum Silicate* (CaAl₂Si₂O₈).



Gambar 1. Difraktogram Batu Basalt Asal Lampung

Disamping *anorthite*, terdapat juga fasa *augite* pada 2θ = 52,03°; yaitu kelompok piroksen atau *Calcium Iron Magnesium Silicate* (Ca(Fe,Mg)Si₂O₆). Fase *albite* terdeteksi dengan

puncak tertinggi pada $2\theta = 29,79^\circ$. *Albite* adalah *Sodium Aluminum Silicate* ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$).

Hasil karakterisasi dengan XRD ini sejalan dengan hasil pengujian dengan XRF bahwa batu basalt didominasi oleh mineral CaO , Fe_2O_3 , SiO_2 , dan Al_2O_3 .

Komposisi Mineral Klinker

Komposisi mineral klinker hasil pemanasan pada 1100 dan 1200°C disajikan berturut-turut pada Tabel 3 dan Tabel 4 (hasil karakterisasi dengan XRF). Penambahan batu basalt pada bahan baku utama klinker ternyata tidak terlalu mempengaruhi komposisi mineral klinker.

Kadar CaO di dalam klinker bervariasi: sedikit di bawah atau sedikit di atas standar (Tabel 3 dan Tabel 4). Kadar CaO yang di atas standar akan dapat mempengaruhi kualitas semen, yaitu pecah-pecah setelah terjadi ikatan dengan air. Sebaliknya semen akan lemah, jika kekurangan CaO . Lemahnya ikatan semen juga dapat diakibatkan oleh temperatur yang kurang tinggi, atau kalsinasi CaCO_3 kurang sempurna.

Kadar alumina klinker hasil percobaan ini umumnya di bawah standar (Tabel 4). Sehingga dapat diperkirakan semen akan memiliki waktu ikatan lambat, tetapi kekuatan tinggi dan ketahanan terhadap agresori kimia tinggi. Kandungan besi oksida diperkirakan akan menjadikan semen berwarna abu-abu [10].

Tabel 3. Komposisi Mineral Klinker Hasil Pemanasan 1100°C

Komposisi dalam %-Massa, Hasil XRF											
	90-10-00-1100			80-20-00-1100			80-20-20-1100			Standar	
Oksida	1 jam	2 jam	3 jam	1 jam	2 jam	3 jam	1 jam	2 jam	3 jam	ASTM C150	
CaO	52,75	56,48	57,88	67,71	59,99	66,16	68,29	70,53	65,20	65,5 – 66,2	
SiO ₂	29,02	30,47	30,87	24,08	22,31	22,22	22,13	22,10	19,41	21,0 – 22,0	
Al ₂ O ₃	8,22	5,47	8,03	7,29	4,40	6,66	4,79	3,79	5,47	5,0 – 5,5	
Fe ₂ O ₃	15,12	12,22	14,51	9,92	9,55	11,96	8,25	8,49	8,88	4,0 – 4,5	
MgO	0,56	1,00	0,64	1,41	1,59	1,52	0,64	0,93	0,70	maks 1,5	

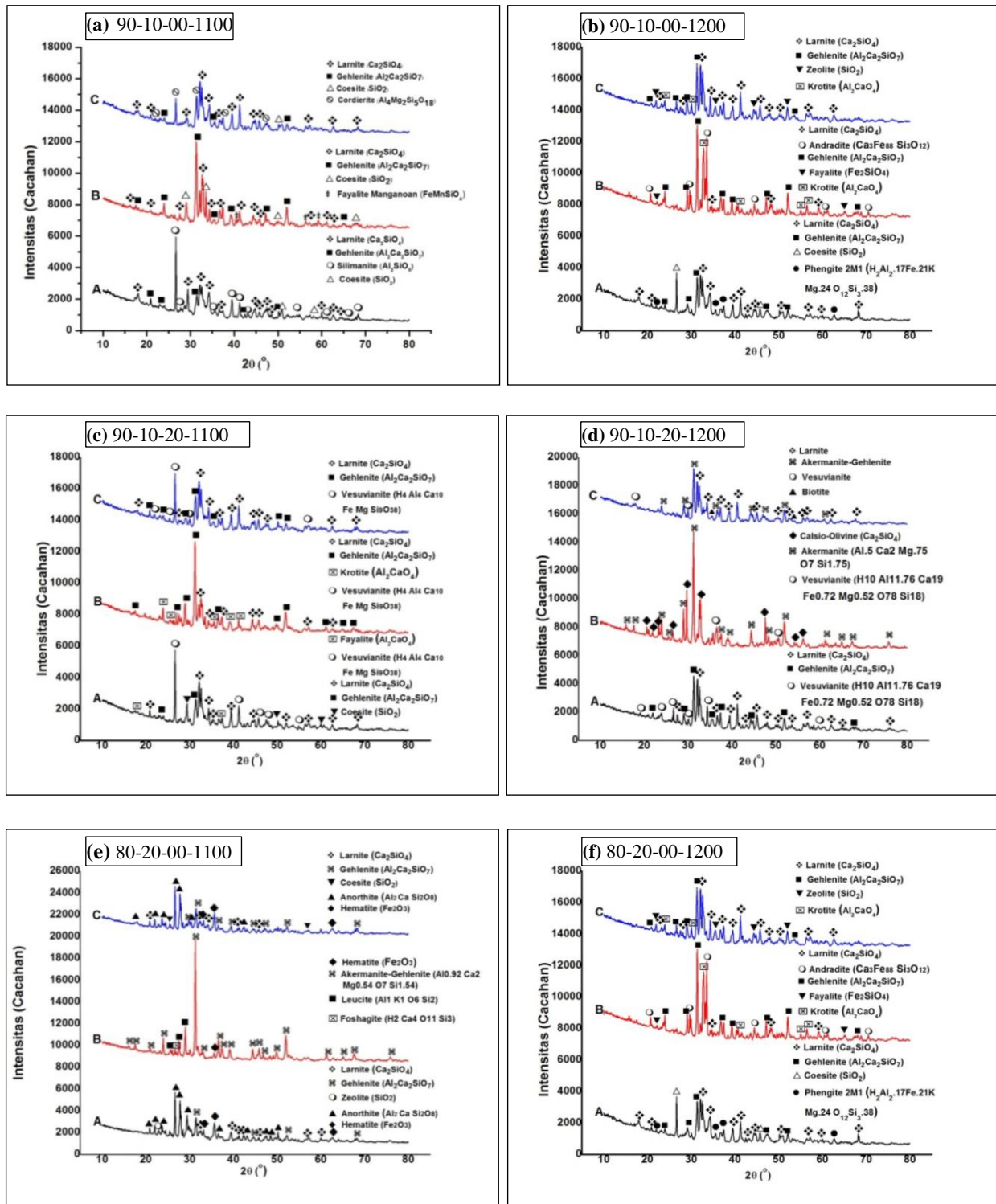
Tabel 4. Komposisi Mineral Klinker hasil Pemanasan pada 1200°C

Komposisi dalam %-Massa, Hasil XRF											
	90-10-00-1200			80-20-00-1200			80-20-20-1200			Standar	
Oksida	1 jam	2 jam	3 jam	1 jam	2 jam	3 jam	1 jam	2 jam	3 jam	ASTM C150	
CaO	63,23	64,21	66,92	68,29	63,01	66,63	68,29	70,53	65,20	65,5 – 66,2	
SiO ₂	20,16	20,07	21,21	22,13	20,70	21,20	22,13	22,10	19,41	21,0 – 22	
Al ₂ O ₃	4,62	4,37	4,86	4,79	4,27	5,04	4,79	3,79	5,47	5,0 – 5,5	
Fe ₂ O ₃	8,09	8,36	8,05	8,25	9,58	8,22	8,25	8,49	8,88	4,0 – 4,5	
MgO	0,72	0,91	0,76	1,59	1,60	1,44	0,75	0,88	0,68	maks 1,5	

Karakterisasi Klinker dengan XRD

Difraktogram klinker disajikan pada Gambar 2 untuk tiga macam bahan baku, temperatur pemanasan 1100 dan 1200°C, dan variasi lama pemanasan. Puncak tinggi difraktogram klinker berada pada sudut defraksi disekitar $2\theta = 30^\circ$. Dan puncak tinggi ini umumnya ditempati oleh fase *larnite* (Ca_2SiO_4), dan *gehlenite* ($\text{Al}_2\text{Ca}_2\text{SiO}_7$).

Fase *andradite* ($\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$) terdeteksi pada sudut $2\theta = 30^\circ$ untuk klinker 90-10-00-1200 (Gambar 2.b) dan 80-20-00-1200 (Gambar 2.f) dengan waktu pemanasan 2 jam. Fase *andradite* juga terdeteksi pada klinker 90-10-20-1200 (Gambar 2.c). Kemunculan fase *andradite* ini diperkirakan karena pencampuran batubara di dalam pelet bahan baku yang dapat meningkatkan temperatur pemanasan.



Gambar 2. Difraktogram Klinker untuk Tiga Macam Bahan Baku dan Dua Temperatur Pemanasan Waktu Pemanasan: A = 1 jam; B = 2 jam; C = 3 jam
 Kode XX-YY-ZZ-xxxx: XX = bahan baku utama; YY = batu basalt; ZZ = batubara (lihat Tabel 1)

Dari bahan baku 90-10-00-1100 (90% campuran-I dan 10% batu basalt, tanpa penambahan batubara, dan pemanasan pada 1100°C), lama pemanasan terlihat mempengaruhi pembentukan fase. Jika waktu pemanasan 1 jam, fase *larnite* terdeteksi pada beberapa sudut difraksi, dan puncak pada sudut difraksi $2\theta = 30^\circ$ tidak terlalu tinggi (Gambar 2.a). Jika waktu pemanasan 3 jam, puncak fase *larnite* pada sudut difraksi $2\theta = 30^\circ$ terdeteksi lebih tinggi. Sedangkan pada klinker hasil pemanasan selama 2 jam menunjukkan terjadinya fase *gehlenite* berdekatan dengan fase *larnite* pada sudut difraksi sekitar $2\theta = 30^\circ$.

Pemanasan bahan baku 90-10-00 sampai dengan temperatur 1200°C (Gambar 2.b) menghasilkan klinker dengan penampakan *larnite* dan *gehlenite* lebih tinggi daripada klinker hasil 1100°C (Gambar 2.a). Dengan membandingkan Gambar-gambar (2.c terhadap 2.d) dan Gambar-gambar (2.e terhadap 2.f), terlihat pengaruh temperatur pada pembentukan fase kristalin.

Efek lama pemanasan terhadap pembentukan fase-fase kristalin pada pemanasan 1100°C dapat dilihat dengan membandingkan difraktogram-A, -B dan -C setiap Gambar 2.a, 2.c dan Gambar 2.e. Fase *larnite*, *vesuvianite*, dan *gehlenite* terlihat pada klinker hasil pemanasan 1, 2, dan 3 jam. Fase *fayalite* dan *coesite* hanya terdeteksi pada klinker hasil pemanasan 1 jam, sedangkan fase *krotite* (Al_2CaO_4) terdeteksi pada klinker dari bahan baku (90-10-00) dengan pemanasan 2 jam.

Fase-fase yang muncul pada klinker hasil pemanasan 1 jam, hilang pada 2 jam, dan muncul kembali pada klinker hasil pemanasan 3 jam, adalah *larnite*, *gehlenite*, dan *anorthite*. Fenomena ini juga teramati pada penelitian [11]. Dalam sistem produksi klinker, hal semacam ini dapat terjadi akibat temperatur pembakaran kurang tinggi dan proses klinkerisasi (pembentukan klinker) kurang sempurna.

Efek lama pemanasan terhadap pembentukan fase-fase kristalin pada pemanasan 1200°C dapat dilihat dengan membandingkan difraktogram-A, -B dan -C pada setiap Gambar 2.b, 2.d dan Gambar 2.f. Fase *vesuvianite* (kristal bening berwarna) terdeteksi pada klinker dengan bahan baku yang ditambahi batubara, hasil pemanasan 1, 2, dan 3 jam (Gambar 2.d). Penambahan batubara diharapkan dapat menaikkan temperatur pelet sampai melampaui 1200°C (*set point* dari *muffle furnace*).

Semua hasil karakterisasi dengan XRD menunjukkan bahwa pada temperatur pemanasan 1100°C sudah terjadi proses pembentukan $2CaO.SiO_2$ (*dicalcium silicate*, C_2S) yang merupakan komponen utama klinker semen. Analisis dengan XRF menunjukkan bahwa klinker hasil percobaan ini memiliki kandungan CaO lebih dari 60% (Tabel 3 dan Tabel 4).

Fase-fase yang diharapkan pada proses klinkerisasi dalam penelitian ini tidak atau belum terdeteksi. Hal ini mungkin disebabkan karena pemanasan bahan baku menjadi klinker hanya dilakukan pada temperatur 1100°C dan 1200°C. Secara teori, pembentukan klinker yang baik memerlukan temperatur pemanasan 1450°C. Pada pemanasan 1450°C tersebut, akan terbentuk fase-fase: *alite* (C_3S), *belite* (C_2S), *aluminat* (C_3A) dan *ferrite* (C_4AF) [12].

Analisis klinker dengan XRF menunjukkan bahwa kandungan CaO (Tabel 2 dan Tabel 3), komponen utama dalam semen, lebih dari 60% [13]. Hasil ini menunjukkan bahwa klinker hasil percobaan ini memenuhi syarat dengan kandungan CaO lebih dari 60%.

Penambahan batubara sebanyak 20% belum mampu menaikkan temperatur pemanasan proses klinkerisasi hingga temperatur 1450°C. Di dalam klinker (90-10-20-1200), belum terbentuk fase *alite*, *belite*, *aluminat* dan *ferrit*, sebaliknya terbentuk fasa baru antara lain: *akermanite-gehlenite*, *larnite*, *vesuvianite*, dan *biotite* [14].

Kandungan Mineral

Kandungan mineral dalam klinker dinyatakan dalam berbagai indeks yang terkait dengan komposisinya [10]. Hasil-hasil analisis XRF pada klinker dari bahan baku 80-20-20 disajikan berikut ini.

LSF (*Lime Saturation Factor*) menunjukkan jumlah maksimum CaO yang diperlukan untuk bereaksi dengan oksida lain sehingga tidak terjadi *free lime* yang berlebihan di dalam klinker. LSF klinker berkisar antara 94-98% (menurut ASTM C150 [10]). LSF dihitung sebagai berikut.

$$LSF = \frac{100 \text{ CaO}}{2,8 \text{ SiO}_2 + 1,18 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \text{ Fe}} \quad (1)$$

SM (*Silica Modulus*) merupakan indikator tingkat kesulitan pembentukan klinker dari bahan baku (*raw material*). SM juga merupakan perbandingan antara oksida silika terhadap oksida alumina dan oksida besi. SM

klinker berkisar antara 2%-2,4% (ASTM C150) [10]. SM dihitung dengan persamaan:

$$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (2)$$

AM (*Alumina Modulus*) merupakan perbandingan antara oksida alumina dengan oksida besi. Besaran AM akan berpengaruh pada warna klinker, makin tinggi nilai AM makin terang warna dari semen tersebut. AM biasanya berkisar antara 1,4%-1,8% (ASTM C150) [15].

$$AM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (3)$$

C₃S (*Tricalcium Silicate*, 3CaO.SiO₂) merupakan komponen utama dalam klinker yang terbentuk pada 1200°C-1450°C. C3S atau *alite* memberi kekuatan awal semen (sebelum 28 hari) dan dapat mempengaruhi kekuatan akhir semen. C3S dihitung menggunakan persamaan:

$$C_3S = 4,071 CaO - 7,602 SiO_2 - 6,718 Al_2O_3 - 1,4297 Fe_2O_3 \quad (4)$$

C₂S (*Dicalcium Silicate*, 2CaO.SiO₂ atau *belite*) terbentuk pada suhu 800°C-900°C dan

memberi kekuatan akhir pada semen. Nilai C₂S umumnya berkisar antara 15%-35%. C₂S dapat dihitung dengan persamaan:

$$C_2S = 4,071 CaO - 7,602 SiO_2 \quad (5)$$

C₃A (*Tricalcium Aluminate*, 3CaO.Al₂O₃) terbentuk pada suhu 1100-1200°C. C3A berperan dalam menentukan kuat tekan awal dari semen. Kandungan C3A di dalam semen antara 7%-15%. C3A dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$C_3A = 2,6504 Al_2O_3 - 1,6920 Fe_2O_3 \quad (6)$$

C₄AF (*Tetracalcium Aluminoferrite*, 4CaO.Al₂O₃.FeO₃ atau *ferrite*) berperan dalam pembentukan warna pada semen. Kandungan C4AF pada semen antara 5%-10%. C4AF dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$C_4AF = 3,0432 Fe_2O_3 \quad (7)$$

Hasil perhitungan LSF, SM, AM, C₃S, C₂S, C₃A dan C₄AF untuk klinker dari bahan baku dengan penambahan batubara disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Nilai-nilai LSF, SM, AM, C₃S, C₂S, C₃A dan C₄AF klinker

Parameter	80-20-20-1100			80-20-20-1200			Keterangan ASTM C150-1999
	1 jam	2 jam	3 jam	1 jam	2 jam	3 jam	
LSF, %	94,1	90,2	95,1	93,6	97,7	98,0	94 – 98
SM, %	2,18	2,20	2,32	2,37	2,39	2,40	1,0 – 2,4
AM, %	0,78	1,00	1,46	1,48	1,67	1,80	1,4 – 1,8
C ₃ S, %	65,8	81,5	68,4	65,8	81,5	68,4	50 – 62
C ₂ S, %	11,0	17,0	19,8	3,9	18,7	25,9	15 – 35
C ₃ A, %	1,96	3,77	4,06	6,54	6,08	6,98	7 – 15
C ₄ AF, %	26,0	18,7	20,7	25,1	22,2	19,3	5 – 10

Klinker dari bahan baku dengan 20% basalt dan 20% batubara rata-rata telah memenuhi syarat baik dipanaskan pada suhu 1100°C dan 1200°C dan waktu 1, 2, dan 3 jam (Tabel 5). Hal ini dapat dilihat dari nilai LSF (perbandingan kadar CaO terhadap oksida lain) yang mencapai 98%, sesuai dengan persyaratan nilai LSF 94%-98% [15].

Klinker dari bahan baku 80-20-20 juga memenuhi syarat nilai SM (perbandingan antara oksida silika terhadap oksida alumina dan oksida besi) sekitar 2,0%-2,4%. Klinker hasil pemanasan pada temperatur 1100°C dan waktu 2 dan 3 jam berturut-turut adalah 2,2% dan 2,32% (Tabel 5). Klinker hasil pemanasan pada 1200°C dengan waktu 1, 2, dan 3 jam memiliki nilai SM berturut-turut 2,37%, 2,39%, dan 2,4%. Hal ini

sejalan dengan hasil dari [11]. Semakin banyak oksida silika di dalam klinker, oksida tersebut mungkin akan menutupi pori-pori klinker. Jika bahan baku dengan komposisi ini dipanaskan sampai diatas 1450°C, ada kemungkinan terjadi vitrifikasi (pembentukan gelas) yang tidak diinginkan [16].

Ditinjau dari perbandingan jumlah oksida alumina terhadap oksida besi, klinker dari bahan baku dengan pemanasan 1100°C dan waktu 3 jam memiliki nilai AM 1,46% (Tabel 5). Jika bahan baku tersebut dipanasi pada temperatur 1200°C, pada lama pemanasan 1 jam, nilai AM sudah memenuhi syarat. Nilai AM untuk pemanasan pada 1200°C dan waktu 1, 2, 3 jam berturut-turut adalah 1,48%, 1,67%, dan 1,8%. Rata-rata nilai AM tersebut mirip dengan hasil penelitian [11].

KESIMPULAN DAN SARAN

Pembentukan klinker dengan pemanasan pada temperatur 1200°C dan waktu 3 jam dapat memenuhi persyaratan. Hasil karakterisasi dengan XRD menunjukkan bahwa klinker didominasi oleh fase *larnite* atau Ca_2SiO_4 dan *gehlenite* atau $\text{Al}_2\text{Ca}_2\text{SiO}_7$.

Klinker dari bahan baku 80-20-20 (80% bahan bahu utama dan 20% batu basalt, serta penambahan batubara 20% terhadap campuran) memiliki nilai LSF 95,1% (pemanasan 1100°C dan 3 jam), serta 97,7% dan 98,0% (1200°C, dan waktu 2 dan 3 jam). Selanjutnya dapat disimpulkan penambahan batubara ke dalam bahan baku dapat membantu kenaikan temperatur pemanasan dan mempengaruhi komposisi dan fase klinker

Agar klinker hasil percobaan ini benar-benar memenuhi standar, penelitian lanjutan sebaiknya dilakukan dengan memperhatikan hal-hal berikut ini.

1. Variasi kondisi klinkerisasi: temperatur sedikit lebih tinggi dan waktu pemanasan sedikit lebih lama untuk meningkatkan proses klinkerisasi tetapi masih belum mencapai vitrifikasi.
2. Pengukuran temperatur pada pelet bahan baku yang ditambahi batubara untuk mengetahui temperatur nyatanya (terkait dengan klinkerisasi dan vitrifikasi).
3. Pengujian kualitas klinker perlu dilanjutkan dengan uji kuat tekan mortar semen.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada Pimpinan BPTM-LIPI yang telah memfasilitasi kami untuk melakukan penelitian ini dan Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung serta semua pihak yang terlibat dalam penelitian ini sehingga kami dapat menyelesaikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bodil Ho'kfors., Dan Bostro'm., Erik Viggh., and Rainer Backman. "On the Phase Chemistry of Portland Cement Clinker". *Advances in Cement Research*, Volume 27 Issue 1, pp. 50-60, 2015.
- [2] Intan Andhini Puspita Sari, Pramusanto., Sriwidayati. "Analisa Klinker Berdasarkan Lime Saturation Factor (LSF), Silica Modulus (SM) dan Alumina Modulus (AM) untuk Menjaga Kualitas Produk di

PT Cemindo Gemilang Desa Darmasari Kecamatan Bayah Kabupaten Lebak Provinsi Banten". *Prosiding Teknik Pertambangan*, Volume 4, No.1, Tahun 2018, ISSN: 2460-6499, hal 1-10, 2018.

- [3] Nur, Rasdiana Rahma., Hartanti, Firda Dwi., dan Sutikno, Juwari Purwo. "Studi Awal Desain Pabrik Semen Portland dengan Waste Paper Sludge Ash sebagai Bahan Baku Alternatif". *Jurnal Teknik ITS*, vol. 4, no. 2, ISSN 2337-353, 2015.
- [4] Rajiman, Alisjahbana Sofia W, Riyanto Hery, Hasyim Cholil, Setiawan Muhammad Ikhsan, Harmanto Dani, dan Wajdi Muh Barid Nizarudin. "Substitution Local Resources Basalt Stone Scoria Lampung, Indonesia, as a Third Raw Material Aggregate to Increase the Quality of Portland Composite Cement (PCC)". *International Journal of Engineering & Technology*. pp. 484-490, 2018.
- [5] Widodojoko, Lilies. dan Rajiman, "Kinerja Mortar Abu Batu Basalt Skoria dengan Menggunakan Semen Serbaguna Baturaja dan Superplasticiser Structuro 335". *Jurnal Teknik Sipil UBL*. Vol. 02. No. 01. Hal. 79-87, 2011.
- [6] Mohamed Benmohamed, Rabah Alouani, Amel Jmayai, Abdesslem Ben Haj Amara, and Hafsia Ben Rhaïem. "Morphological Analysis of White Cement Clinker Minerals: Discussion on the Crystallization - Related Defects". *International Journal of Analytical Chemistry*, Volume 2016, Article ID 1259094, 10 pages, 2016.
- [7] Leni Rumiyantri, Yuliana Sari, dan Muhammad Amin. "Pengaruh Temperatur terhadap Karakterisasi Klinker Semen dengan Substitusi 20% Batu Basalt terhadap Massa Batu Kapur dan 20% batu bara terhadap Massa Total sebagai Reduktor". *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, vol 7. No.1, hal 29-34, 2019.
- [8] ASTM C618-12a, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete", *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2012
- [9] Al-Rawas, A.A., Hago, A.W., Corcoran, T.C., Al-Ghafri, K.M. "Properties of Omani Artificial Pozzolana S arooj". *Applied Clay Science*, vol. 13, pp. 275-292, 1998.

- [10] ASTM-C150., “Standard Specification for Portland Cement”. *West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials (ASTM) International*. 2015.
- [11] Alextrianto, Vandi dan Ekaputri Januarti. “Pemanfaatan Kapur (CaCO_3) dan Lumpur Sidoarjo sebagai Bahan Dasar Pembuatan Semen Portland”. *PORTAL Jurnal Teknik Sipil*, vol. 11, no.2. pp. 38-45, 2019.
- [12] El-Desoky, H. M., Zidan, I. H. dan El-Shafey, R. E., “Apparaisal of Sedimentary and Volcanic Rocks at Al- Hemmah-Resan Ikteifa District, North Sinai, Egypt as Raw Materials in Portland Cemen Clinker Production”, *International Journal of Innovative and Applied Research*. Vol. 10. No. 12. Pp. 1324-1331, 2017.
- [13] El-Hafiz., N. A. A., Wageeh, M., El-Desoky, H. dan Afifi, A. A., “Characterization and Technological Behavior of Basalt Raw Materials Portland Cement Clinker Production”. *International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology*., Vol. 2. No. 7. Pp. 1-28, 2015.
- [14] Dahliar, Nurlianti., Widodo, Sri., dan Tonggiroh,Adi. “Pengaruh Komposisi Ash batu bara Terhadap Kualitas Klinker Portland Cement pada PT. Semen Tonasa Unit III”. *GEOSAINS*. Vol. 10 No. 02. Hal 58-67, 2014.
- [15] Alemayu, F., dan Sahu, O. “Minimization of Variation in Clinker Quality”. *Advances in Materials*, pp. 23-28, 2013.
- [16] Amaryllis Kartika Ratri, Sriatun, Adi Darmawan,. “Variasi Suhu Pembakaran pada Pembuatan Genteng Lempung Sedimentasi Banjir Kanal Timur Kota Semarang terhadap Kuat Tekan serta Daya Serapnya terhadap Air”, *Journal of Scientific and Applied Chemistry*, 11 (3): 63 – 69, 2008.