

PENGARUH PENAMBAHAN BAHAN BAKU ALTERNATIF TERHADAP KUALITAS DAN EFISIENSI PRODUKSI SEMEN DI PT SEMEN INDONESIA (PERSERO) TBK

Nabila Priska Permadani¹, Luchis Rubianto¹, Jaenuri²

¹Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

²PT Semen Indonesia (Persero) Tbk Jl. Semen Indonesia, Area Ladang, Sumberarum, Kec. Kerek,
Kabupaten Tuban, Jawa Timur

nabillapriska0402@gmail.com ; [luchis.rubianto@polinema.ac.id, jaenuri@sig.id]

ABSTRAK

Industri semen merupakan salah satu penyumbang emisi CO₂ global sebesar 5-8%, sehingga diperlukan upaya strategis untuk meningkatkan efisiensi proses dan keberlanjutan melalui pemanfaatan bahan baku alternatif. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh substitusi bahan baku alternatif terhadap kualitas dan efisiensi produksi semen di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Metode penelitian menggunakan analisis data sekunder yang diperoleh dari unit *Quality Control* (QC), *Quality Assurance* (QA), dan *Perencanaan Bahan Produksi* (PBP) di Plant Tuban Unit Section of RKC 1 selama periode September-Desember 2024. Variabel yang dikaji meliputi komposisi kimia klinker, parameter fisika semen, efisiensi produksi, konsumsi energi, serta faktor klinker. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemanfaatan *fly ash*, *bottom ash*, dan *paper sludge* memberikan pengaruh positif terhadap kualitas klinker dengan nilai *Lime Saturation Factor* (LSF) sebesar 99,26%-101,71%, *Silica Ratio* (SR) rata-rata 2,2, dan *Alumina Ratio* (AR) rata-rata 1,62. Parameter fisika menunjukkan waktu ikat awal 140-207 menit dan kuat tekan maksimum 489 kg/cm². Efisiensi produksi berkisar 54,04%-83,52% dengan efisiensi energi rata-rata 79,98% dan efisiensi klinker 66,18%-69,86%. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan bahan baku alternatif mampu meningkatkan efisiensi produksi, mempertahankan kualitas semen, serta mendukung keberlanjutan melalui penurunan faktor klinker dan emisi karbon.

Kata kunci: bahan baku alternatif, efisiensi produksi, emisi karbon, kualitas semen

ABSTRACT

The cement industry is one of the major contributors to global CO₂ emissions, accounting for approximately 5-8%, thus requiring strategic efforts to improve process efficiency and sustainability through the utilization of alternative raw materials. This study aims to analyze the effect of substituting alternative raw materials on the quality and production efficiency of cement at PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. The research method employed secondary data analysis obtained from the *Quality Control* (QC), *Quality Assurance* (QA), and *Production Material Planning* (PBP) units at Plant Tuban, Section of RKC 1, during the period of September to December 2024. The variables analyzed include clinker chemical composition, cement physical parameters, production efficiency, energy consumption, and clinker factor. The results indicate that the use of fly ash, bottom ash, and paper sludge has a positive impact on clinker quality, with *Lime Saturation Factor* (LSF) values ranging from 99.26% to 101.71%, an average *Silica Ratio* (SR) of 2.2, and an average *Alumina Ratio* (AR) of 1.62. Physical parameters show an initial setting time of 140-207 minutes and a maximum compressive strength of 489 kg/cm². Production efficiency ranges from 54.04% to 83.52%, with an average energy efficiency of 79.98% and clinker efficiency between 66.18% and 69.86%. These findings demonstrate that the use of alternative raw materials can enhance production efficiency, maintain cement quality, and support sustainability through the reduction of clinker factor and carbon emissions.

Keywords: alternative raw materials, production efficiency, carbon emissions, cement quality

Corresponding author: Luchis Rubianto

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang

Jl. Soekarno-Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

E-mail: luchis.rubianto@polinema.ac.id



1. PENDAHULUAN

Industri semen memegang peranan vital dalam pembangunan infrastruktur nasional dan merupakan salah satu indikator perkembangan ekonomi suatu negara. PT Semen Indonesia (Persero) Tbk sebagai salah satu produsen semen terbesar di Indonesia beroperasi dengan kapasitas produksi mencapai 30 juta ton semen per tahun dan menawarkan berbagai jenis produk untuk memenuhi kebutuhan pasar domestik maupun internasional. Namun, di balik kontribusinya yang signifikan terhadap pembangunan, industri semen juga dihadapkan pada berbagai tantangan, terutama terkait aspek lingkungan dan keberlanjutan. Industri semen dikenal sebagai salah satu penyumbang utama emisi karbon dioksida (CO₂) global. Dalam proses produksi semen, setiap ton semen yang dihasilkan dapat menghasilkan hampir satu ton CO₂ akibat pembakaran bahan bakar fosil dan proses kalsinasi batu kapur [1]. Hal ini menjadikan industri semen bertanggung jawab atas sekitar 5-8% dari total emisi CO₂ antropogenik global [2]. Selain itu, ketersediaan bahan baku utama, khususnya batu kapur, juga menjadi perhatian serius. Produksi 1 ton semen memerlukan sekitar 1,5 ton batu kapur (CaCO₃), sehingga eksploitasi berlebihan terhadap sumber daya alam ini dapat mengancam keberlanjutan industri di masa depan.

Beberapa penelitian terdahulu telah menunjukkan potensi penggunaan bahan baku alternatif dalam industri semen. Penggunaan *fly ash* sebagai pengganti sebagian bahan baku konvensional dapat mengurangi suhu pembakaran, menurunkan kebutuhan bahan bakar, serta meningkatkan daya tahan produk semen. Penelitian lain menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* hingga 25% masih dapat memenuhi standar kualitas semen yang berlaku. Selain itu, penambahan *bottom ash* terhadap campuran bahan baku diketahui tidak hanya mampu mengurangi emisi karbon, tetapi juga meningkatkan kuat tekan semen [3]. Pemanfaatan *paper sludge* sebagai limbah dari industri kertas juga menunjukkan potensi yang signifikan, karena material ini dapat digunakan untuk mengurangi konsumsi batu kapur serta menekan emisi CO₂ melalui proses kalsinasi. Secara umum, bahan-bahan alternatif tersebut memiliki kandungan kimia seperti SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O₃ yang bersifat pozzolanik dan berperan dalam pembentukan senyawa penyusun semen [4].

Produksi semen Portland konvensional melibatkan beberapa tahapan utama, yaitu penambangan bahan baku, penggilingan dan pencampuran, pembakaran dalam kiln pada suhu sekitar 1400°C, serta penggilingan klinker dengan penambahan gypsum. Proses ini membutuhkan energi yang sangat besar dan menghasilkan emisi CO₂ yang signifikan. Dalam konteks ini, pemanfaatan bahan baku alternatif seperti *fly ash*, *bottom ash*, dan *paper sludge* menjadi salah satu solusi yang potensial untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan baku konvensional sekaligus meningkatkan efisiensi proses produksi.

Berdasarkan latar belakang dan hasil penelitian terdahulu tersebut, dapat disimpulkan bahwa penggunaan bahan baku alternatif memiliki potensi besar dalam menurunkan emisi karbon dan meningkatkan efisiensi produksi semen. Namun, kajian yang secara langsung menghubungkan pengaruh bahan baku alternatif terhadap kualitas semen dan efisiensi produksi dalam kondisi operasional industri masih perlu dilakukan secara lebih komprehensif.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan bahan baku alternatif terhadap kualitas semen yang dihasilkan serta efisiensi proses produksi di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Plant Tuban selama September-Desember 2024 dengan tujuan menganalisis pengaruh penambahan bahan baku alternatif terhadap kualitas semen dan efisiensi produksi semen. Metode yang digunakan meliputi pengumpulan data sekunder dari unit QC (*Quality Control*), QA (*Quality Assurance*), dan PBP (Perencanaan Bahan Produksi), mencakup data kimia dan fisika semen, konsumsi energi, serta jumlah bahan baku dan klinker yang digunakan. Efisiensi dihitung berdasarkan perbandingan antara output dan input aktual terhadap nilai teoritis, meliputi efisiensi produksi, energi, dan *clinker factor*. Penelitian ini diawali dengan identifikasi masalah terkait keterbatasan bahan baku utama seperti batu kapur dan tanah liat, yang berdampak negatif terhadap lingkungan. Sebagai solusi, diterapkan penggunaan bahan baku alternatif seperti *fly ash*, *bottom ash*, dan *paper sludge*. Adapun prosedur perhitungan yang dilakukan sebagai berikut:

1. Menghitung efisiensi produksi

$$\eta \text{ produksi} = \frac{X_s}{X_b} \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan:

X_s = jumlah semen yang diproduksi (ton)

X_b = jumlah bahan baku yang digunakan (ton)

2. Menghitung efisiensi energi

$$\eta \text{ energi} = \frac{E_a}{E_t} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan:

E_a = energi aktual untuk proses produksi (kkal/kg)

E_t = energi teoritis yang diperlukan (kkal/kg)

3. Menghitung efisiensi *clinker*

$$\eta \text{ clinker} = \frac{B_c}{T_s} \times 100\% \quad (3)$$

Keterangan:

B_c = Berat *clinker* (ton)

T_s = Total semen (ton)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Kualitas Semen Secara Kimia

Tabel 1 menyajikan data hasil pengujian kualitas kimia semen selama periode Januari hingga Juni yang mencakup berbagai parameter, meliputi komposisi unsur kimia, parameter modulus, senyawa utama pembentuk semen, serta parameter pendukung lainnya seperti kehalusan, komposisi bahan tambahan, dan *Loss on Ignition* (LOI). Data tersebut ditampilkan untuk memberikan gambaran umum mengenai karakteristik kimia semen terhadap waktu produksi.

Berdasarkan hasil analisis data bulan Januari-Desember tahun 2023, kualitas klinker dipengaruhi oleh komposisi mineral dan parameter kimia utama yang kemudian dibandingkan dengan standar dalam literatur. Nilai *Lime Saturation Factor* (LSF) yang diperoleh berada pada rentang 99,26%-101,71%, cenderung melebihi nilai ideal 89-98% [5]. Hal ini menunjukkan adanya kecenderungan kelebihan CaO dalam sistem yang berpotensi meningkatkan kadar *free lime* serta mengindikasikan proses pembakaran yang belum optimal. Nilai *Silica Ratio* (SR) yang diperoleh sebesar rata-rata 2,2 relatif mendekati, namun masih berada di bawah rentang yang direkomendasikan (2,3-2,7). Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun komposisi relatif stabil,

terdapat potensi gangguan pada proses pembakaran, seperti peningkatan risiko pembentukan *coating* pada kiln atau ketidakefisienan penggunaan bahan bakar [6].

Tabel 1. Perubahan Komposisi Unsur Kimia Semen terhadap Waktu Produksi (Januari-Juni)

Keterangan	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	
Elemen Mayor	SiO ₂	19,7	19,6	19,6	19,9	19,6	19,8
	Al ₂ SO ₃	5,5	5,5	5,6	5,6	5,7	5,5
	Fe ₂ O ₃	3,3	3,3	3,4	3,3	3,3	3,5
	CaO	63,8	63,8	64,1	64,1	64,1	64,1
	MgO	2,2	2,4	2,0	2,0	2,2	2,0
	Na	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
	K	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4
	Cl	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0
	SO ₃	2,0	2,0	2,0	2,0	2,1	2,1
Modulus	LSF	99,8	100,6	100,7	99,4	100,7	99,7
	SR	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
	AR	1,7	1,7	1,6	1,7	1,7	1,6
	C ₃ S	61,6	62,7	63,2	61,0	62,8	61,6
	C ₂ S	14,3	13,0	12,9	15,4	13,3	14,8
	C ₃ A	9,1	9,0	9,1	9,2	9,4	8,7
	C ₄ AF	10,1	10,1	10,4	10,1	10,1	10,7
	FL	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Lain - Lain	Blaine	345,0	351,3	350,3	349,6	350,0	350,5
	Mesh	4,7	3,7	4,0	4,1	3,7	3,5
	%CLK	89,0	88,3	90,3	89,9	88,3	90,4
	%GYP	4,2	4,0	4,2	3,9	4,0	4,1
	%TRASS	1,3	1,4	0,7	1,4	0,9	1,1
	%DOL	5,6	6,2	7,8	4,8	4,7	4,4
	%FA	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	LOI	3,4	0,9	0,0	3,3	3,4	0,0

Selanjutnya, nilai *Alumina Ratio* (AR) rata-rata sebesar 1,62 berada dalam rentang yang direkomendasikan (1,3–1,6), meskipun sedikit melebihi batas atas. Hal ini menunjukkan bahwa keseimbangan Al₂O₃ dan Fe₂O₃ masih mendukung pembentukan fase cair, namun perlu dikontrol karena nilai yang terlalu tinggi dapat menyulitkan proses pembakaran. Ditinjau dari komposisi mineral, kandungan trikalsium silikat (C₃S) berperan dalam kekuatan awal semen, sedangkan dikalsium silikat (C₂S) dengan nilai rata-rata 13,55% berkontribusi terhadap kekuatan jangka panjang. Kandungan *trikalsium aluminat* (C₃A) sebesar 8,83% masih dalam kisaran normal, namun tetap perlu dikendalikan karena dapat meningkatkan panas hidrasi. Sementara itu, tetrakalsium aluminoferrit (C₄AF) berada dalam kisaran umum 5-10% dan berpengaruh terhadap warna serta panas hidrasi yang relatif rendah.

Tabel 2. Perubahan Komposisi Unsur Kimia Semen terhadap Waktu Produksi (Juli-Desember)

Keterangan	Jul	Agt	Sep	Okt	Nov	Des	Avg	
SiO ₂	19,9	19,8	19,7	10,7	19,8	19,6	19	
Al ₂ SO ₃	5,5	5,4	5,5	0,2	5,5	5,3	5,1	
Fe ₂ O ₃	3,4	3,5	3,3	3,4	3,5	3,4	3,4	
CaO	64	64,3	64,3	64,3	64,1	64,5	64,1	
Elemen Mayor	MgO	2,1	1,8	2	1,9	1,9	1,8	2
	Na	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	K	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4
	Cl	0	0	0	0	0,1	0	0
	SO ₃	2	2	2,1	2,1	2	2,1	2

Keterangan	Jul	Agt	Sep	Okt	Nov	Des	Avg	
LSF	99,3	100,1	100,7	100,5	99,9	101,7	100,3	
SR	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,3	2,2	
AR	1,6	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	
Modulus	C ₃ S	61,2	63,4	64,3	63,9	62,3	62,9	
	C ₂ S	15,4	13,3	12,6	13	14,2	13,5	
	C ₃ A	8,8	8,4	8,8	8,7	8,7	8,8	
	C ₄ AF	10,4	10,7	10,1	10,4	10,7	10,3	
	FL	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
	Mesh	3,9	4	4,1	3,4	3,7	3,8	
	%CLK	89,7	91,4	92,2	93,2	90,9	90,4	
Lain - Lain	%GYP	4,1	3,9	4,2	3,8	4,1	4,1	
	%TRASS	1,4	0,5	0	0	0,7	0,8	
	%DOL	4,9	4,2	3,6	3	4,3	4,9	
	%FA	0	0	0	0	0	0	
	LOI	0	0	0	0	3,3	3,5	1,5

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar parameter telah mendekati standar literatur, namun nilai LSF yang cenderung tinggi menjadi indikator utama yang perlu dikendalikan karena berpotensi meningkatkan kadar *free lime* dan mempengaruhi kualitas klinker yang dihasilkan.

3.2. Kualitas Semen Secara Fisika

Berdasarkan data pada Tabel 3, parameter kualitas fisika semen menunjukkan variasi selama periode pengamatan, namun secara umum masih berada dalam rentang yang dapat diterima. Perubahan nilai pada setiap parameter, seperti *free lime* (FL), *loss on ignition* (LOI), kehalusan (Blaine), waktu ikat, dan kuat tekan, mencerminkan pengaruh kondisi proses produksi dan komposisi bahan baku yang digunakan. Meskipun terjadi fluktuasi antar bulan, tren data menunjukkan bahwa kualitas fisika semen relatif terjaga dan konsisten terhadap waktu produksi.

Tabel 3. Perubahan Komposisi Unsur Fisika Semen terhadap Waktu Produksi (Januari-Desember)

Keterangan	Jan	Feb	Mar	Apr	Jul	Agt	Sep	Okt	Nov	Des	
FL	1,78	1,28	0,98	1,42	0,6	1,3	1,27	1,16	1,38	1,1	
Insol	2,96	5,84	5,26	4,87	7,1	0,36	0,3	0,3	0,57	0,21	
LOI	4,22	12,75	11,16	9,91	12,28	2,57	2,84	2,63	2,7	2,87	
Ekspansi	0,06	0,01	0,07	0	0,03	0,04	0,06	0,05	0,05	0,07	
Residu	5,47	6,88	2,85	2,86	7,07	3,86	5,19	3,73	5,05	3,39	
Blaine	375	413	387	441	403	326	335	333	337	347	
Setting Time	Awal	173	166	182	170	207	156	148	140	138	152
	Akhir	293	300	320	298	321	274	258	256	254	261
Kuat Tekan	1	0	0	0	83	0	112	139	141	161	164
	3	249	160	190	221	180	257	255	265	303	302
	7	311	210	242	269	233	359	336	357	381	370
	18	417	282	297	381	297	455	460	489	0	485

Berdasarkan hasil analisis data selama satu tahun, parameter kualitas fisika semen menunjukkan variasi yang kemudian dibandingkan dengan standar dan temuan dalam literatur. Nilai *free lime* (FL) berkisar antara 0,6% hingga 1,78%, dengan beberapa nilai melebihi 1,5% yang mengindikasikan potensi ekspansi berlebih dan penurunan durabilitas. Kondisi ini menunjukkan adanya CaO bebas yang kemungkinan disebabkan oleh proses pembakaran yang kurang optimal atau distribusi panas yang tidak merata [7,8]. Parameter *insoluble residue* (Insol) menunjukkan rentang nilai 0,21%-7,1%, di mana nilai yang relatif tinggi mengindikasikan keberadaan material tidak larut seperti silika bebas. Jika dibandingkan dengan literatur, nilai Insol yang melebihi batas umum berpotensi menurunkan kekuatan tekan semen akibat kurangnya reaktivitas material. Hal ini dapat disebabkan oleh ukuran partikel bahan baku yang tidak seragam atau adanya kontaminasi selama proses produksi.

Nilai *loss on ignition* (LOI) berkisar antara 2,57% hingga 12,75%, dengan nilai tinggi menunjukkan adanya kandungan air atau bahan organik yang berlebih. Kondisi ini umumnya dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti kelembaban bahan baku, dan menurut literatur, nilai LOI yang tinggi dapat menurunkan efisiensi pembakaran serta kualitas klinker yang dihasilkan. Kehalusan semen (*Blaine*) berada pada rentang 326-441 m²/kg, yang menunjukkan variasi tingkat penggilingan. Nilai *Blaine* yang tinggi meningkatkan luas permukaan partikel sehingga mempercepat reaksi hidrasi, namun juga berdampak pada peningkatan konsumsi energi dan potensi penurunan *workability*. Hal ini sejalan dengan literatur yang menyatakan bahwa kehalusan yang terlalu tinggi dapat mempercepat waktu ikat dan mempengaruhi sifat pengerjaan beton [9].

Waktu ikat awal (*initial setting time*) berkisar antara 140–207 menit dan dipengaruhi oleh kadar gypsum serta tingkat kehalusan semen. Rentang ini masih menunjukkan kondisi yang dapat diterima, di mana waktu ikat yang optimal diperlukan untuk menjaga keseimbangan antara kemudahan pengerjaan dan efisiensi konstruksi [10]. Selain itu, kuat tekan menunjukkan performa yang baik dengan nilai maksimum mencapai 489 kg/cm². Nilai ini mencerminkan kualitas klinker yang baik, kehalusan yang optimal, serta keseimbangan komposisi mineral. Hasil ini sejalan dengan literatur yang

menyatakan bahwa kuat tekan dipengaruhi oleh kombinasi faktor kimia dan fisika semen [11].

3.3. Efisiensi Produksi

Tabel 4 dan 5 menyajikan data parameter efisiensi produksi semen selama periode Januari hingga Juni yang meliputi jumlah produk yang dihasilkan, penggunaan bahan baku pada setiap tahapan proses, serta konsumsi energi panas dan energi listrik. Data ini memberikan gambaran umum mengenai kinerja produksi dan pemanfaatan sumber daya selama proses berlangsung.

Berdasarkan hasil analisis data efisiensi produksi, kinerja produksi semen menunjukkan variasi yang masih berada di bawah target ideal efisiensi (>90%). Hal ini menunjukkan bahwa meskipun proses produksi telah berjalan dengan baik, masih terdapat potensi peningkatan efisiensi jika dibandingkan dengan standar dalam literatur [12]. Upaya peningkatan efisiensi yang dilakukan, seperti optimalisasi proses dan pemanfaatan bahan baku alternatif, sejalan dengan konsep efisiensi industri semen yang menekankan pada peningkatan output dengan penggunaan sumber daya yang lebih optimal. Penerapan strategi optimasi proses, seperti pendekatan *lean manufacturing* dan sistem kontrol proses, berkontribusi terhadap pengurangan pemborosan dan peningkatan produktivitas. Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa implementasi *lean manufacturing* mampu menekan pemborosan produksi dan meningkatkan efisiensi secara signifikan [13]. Selain itu, penggunaan teknologi *Advanced Process Control* (APC) berperan dalam menjaga kestabilan proses serta mengoptimalkan konsumsi energi dan kualitas produk [14].

Ditinjau dari aspek energi, konsumsi energi panas dan listrik masih menunjukkan fluktuasi yang mencerminkan variasi beban produksi dan kondisi operasional. Mengingat industri semen merupakan industri intensif energi, upaya peningkatan efisiensi energi menjadi faktor kunci dalam menekan biaya operasional. Penerapan teknologi *Waste Heat Recovery* (WHR) menjadi salah satu solusi yang efektif dalam memanfaatkan panas buang untuk menghasilkan energi tambahan, sehingga dapat menurunkan konsumsi energi listrik dan emisi [15]. Selain itu, penggunaan bahan bakar dan bahan baku alternatif juga berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi dan keberlanjutan proses produksi. Pemanfaatan limbah industri, biomassa, dan *refuse-derived fuel* (RDF) tidak hanya mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, tetapi juga menekan biaya energi dan dampak lingkungan [16].

Tabel 4. Hubungan Parameter Efisiensi Produksi terhadap Waktu Produksi (Januari-Juni)

Komponen		Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Satuan
Jumlah produk semen yang dihasilkan		537,4	533,2	577,7	380,2	421,0	551,2	Ton
Jumlah bahan baku yang digunakan								
Raw Mill	Batu kapur	718,7	771,5	847,3	448,8	424,5	548,8	Ton
	Tanah liat	172,4	147,9	193,7	125,3	83,7	106,0	
	AR	31,8	26,1	28,1	11,0	26,6	41,7	
Kiln	Cooper slag/P.besi/Bof/Iron one	12,5	17,2	18,4	8,1	8,7	8,3	

Silika	23,1	21,8	25,7	14,4	17,5	17,5	
Klinker	369,3	364,6	394,4	262,9	284,9	374,6	
Trass	31,8	31,3	32,9	18,9	23,9	31,5	
Gypsum	18,6	19,1	19,5	14,1	15,9	18,9	
Batu kapur	131,5	130,4	131,9	90,1	103,4	130,9	
Flyash	6,0	10,3	12,8	7,2	5,6	9,8	
Dust	0,0	0,0	0,0	619,0	481,0	0,0	
Energi panas yang digunakan pada produksi	828,2	830,3	823,7	833,2	827,4	833,8	kkal/kg
Energi listrik yang digunakan pada produksi	91,2	87,4	85,9	92,7	87,4	86,3	kW/ton

Namun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya lebih menekankan pada penerapan teknologi dan strategi peningkatan efisiensi secara umum, tanpa mengaitkannya secara langsung dengan variasi data operasional aktual dari waktu ke waktu. Oleh karena itu, penelitian ini memberikan kontribusi dengan menyajikan analisis berbasis data periodik yang menunjukkan dinamika efisiensi produksi serta keterkaitannya dengan penggunaan bahan baku dan energi. Dengan pendekatan ini, diharapkan diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi produksi secara nyata di lapangan.

Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai hubungan antara parameter efisiensi produksi, efisiensi energi, dan efisiensi klinker terhadap waktu produksi, data hasil analisis disajikan dalam bentuk grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Berdasarkan hasil analisis data pada Gambar 1, efisiensi energi pada proses produksi semen menunjukkan variasi dengan rentang 77,960% hingga 84,110% dan rata-rata sebesar 79,975%. Nilai ini mengindikasikan bahwa pemanfaatan energi panas dalam proses pembakaran klinker telah berlangsung cukup baik, meskipun belum sepenuhnya optimal jika dibandingkan dengan kondisi ideal dalam literatur. Efisiensi tertinggi yang terjadi pada bulan Oktober menunjukkan adanya kondisi operasional kiln yang lebih stabil atau penggunaan bahan bakar yang lebih optimal, sedangkan nilai terendah pada bulan tertentu mencerminkan adanya ketidakseimbangan dalam kualitas bahan baku atau fluktuasi kondisi proses pembakaran [17].

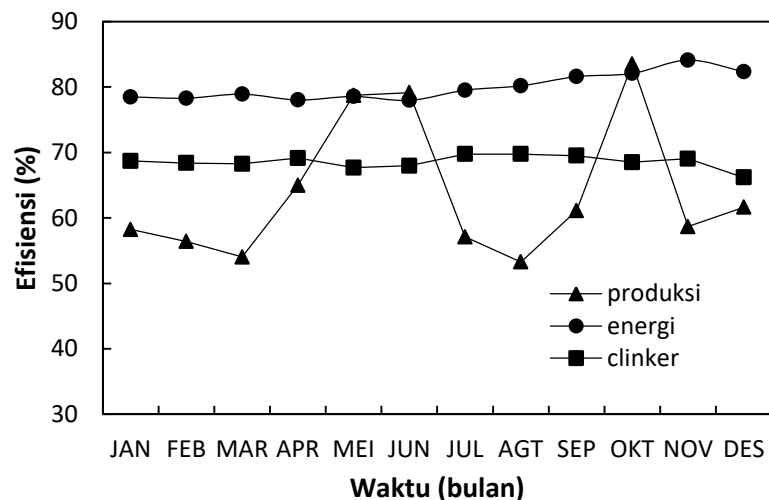
Selanjutnya, efisiensi klinker yang berada pada rentang 66,18%-69,86% menunjukkan tingkat konversi bahan baku menjadi klinker yang relatif stabil, namun masih memiliki ruang untuk peningkatan. Jika dibandingkan dengan literatur, efisiensi klinker dipengaruhi oleh kualitas bahan baku, homogenitas campuran, serta kondisi pembakaran di dalam kiln [18]. Variasi nilai yang terjadi menunjukkan bahwa faktor-faktor tersebut belum sepenuhnya terkontrol secara konsisten selama periode pengamatan.

Secara keseluruhan, peningkatan efisiensi energi dan klinker merupakan aspek penting dalam optimalisasi proses produksi semen karena berpengaruh langsung terhadap biaya operasional dan dampak lingkungan. Hasil penelitian ini sejalan dengan literatur yang menyatakan bahwa efisiensi proses menjadi kunci dalam meningkatkan kinerja industri semen, meskipun implementasinya sangat bergantung pada kestabilan kondisi operasional dan pengendalian parameter proses secara berkelanjutan. Namun

demikian, penelitian ini memberikan kontribusi dengan menyajikan analisis berbasis data periodik yang menunjukkan keterkaitan langsung antara fluktuasi efisiensi energi dan klinker dengan kondisi operasional aktual, yang masih jarang dibahas secara spesifik dalam studi sebelumnya.

Tabel 5. Hubungan Parameter Efisiensi Produksi terhadap Waktu Produksi (Juli-Desember)

Komponen		Jul	Agt	Sep	Okt	Nov	Des	Satuan
Jumlah produk semen yang dihasilkan		649,5	613,8	668,7	672,8	678,4	707,7	Ton
Jumlah bahan baku yang digunakan								
Raw Mill	Batu kapur	911,2	931,6	891,3	648,5	938,5	912	
	Tanah liat	196,5	192,6	168,9	128,9	179,6	200,5	
	AR	29,9	27,9	33,8	28,1	38,2	35,9	
Kiln	Cooper slag/P.besi	14,8	19	21,6	14,1	20	16,2	
	Silika	20,2	24,9	24,4	26	30,4	24,2	
Semen	Klinker	453,8	428,1	464,8	460,9	468,3	468,3	Ton
	Trass	36,4	40,6	41	42,9	41,8	48,1	
	Gypsum	24,2	20,1	24,8	26,4	26,4	28,7	
	Batu kapur	142,9	128	1143,3	148,7	144,2	167,7	
	Flyash	9,6	10,1	9,8	9	10,9	10,7	
	Dust	0	1200	1300	1600	2100	5140	
Energi panas yang digunakan pada produksi		817,4	810,7	796,7	792	772,8	789,4	kkal/kg
Energi listrik yang digunakan pada produksi		84,8	84,2	82,9	83	82,4	82,8	kW/ton



Gambar 1. Hubungan efisiensi produksi, energi, dan *clinker* terhadap Waktu Produksi (Januari-Desember)

4. KESIMPULAN

Penggunaan bahan baku alternatif (*fly ash*, *bottom ash*, dan *paper sludge*) meningkatkan kualitas dan efisiensi produksi semen melalui reaksi pozzolanik. Namun, nilai LSF (99,26%-101,71%) yang melampaui batas ideal menunjukkan potensi kelebihan CaO dan peningkatan *free lime*, sementara SR rata-rata 2,2 relatif stabil tetapi belum optimal. Kinerja efisiensi produksi, energi, dan klinker menunjukkan peningkatan, meskipun masih belum sepenuhnya optimal. Oleh karena itu, pemanfaatan bahan baku alternatif memerlukan pengendalian proses yang lebih ketat untuk menjaga keseimbangan antara kualitas dan efisiensi.

Penelitian selanjutnya perlu menitikberatkan pada optimasi parameter proses, khususnya pengendalian LSF dan *free lime*, guna menghindari ketidakseimbangan komposisi kimia klinker. Selain itu, diperlukan pendekatan yang lebih terintegrasi dalam menentukan proporsi bahan baku alternatif agar tidak hanya berorientasi pada efisiensi, tetapi juga menjaga kualitas produk secara konsisten. Studi lanjutan juga disarankan untuk mengevaluasi interaksi antara bahan baku alternatif dan kondisi operasional kiln, serta dampaknya terhadap performa semen dalam jangka panjang, sehingga implementasinya dapat lebih optimal dan berkelanjutan.

REFERENSI

- [1] M. B. Ali, R. Saidur, dan M. S. Hossain, "A review on emission analysis in cement industries," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 5, hal. 2252–2261, 2011.
- [2] R. M. Andrew, "Global CO₂ emissions from cement production , 1928 – 2017 1 Introduction to Previous estimates of global cement emissions," *Earth System Science Data*, vol. 10, no. 4, hal. 1–20, 2021.
- [3] S. U. Dewi dan F. Prasetyo, "Analisa Penambahan Bottom Ash Terhadap Kuat Tekan Dan Kuat Tarik Belah Beton," *JICE (Journal Infrastructural Civil Engineering)*, vol. 2, no. 02, hal. 31, 2021.
- [4] B. H. Woo, I. K. Jeon, D. H. Yoo, S. S. Kim, J. B. Lee, dan H. G. Kim, "Utilization of municipal solid waste incineration bottom ash as fine aggregate of cement mortars," *Sustainability*, vol. 13, no. 16, 2021.
- [5] H. F. W. Taylor, *Cement chemistry, 2nd edition. London: Thomas Telford*, 1997.
- [6] S. Telschow, F. Frandsen, K. Theisen, dan K. Dam-Johansen, "Cement formation-A success story in a black box: High temperature phase formation of portland cement clinker," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 51, no. 34, hal. 10983–11004, 2012.
- [7] D. Rubinaite, T. Dambrauskas, K. Baltakys, dan R. Siauciunas, "Effect of Hydrothermal Curing on the Hydration and Strength Development of Belite Cement Mortar Containing Industrial Wastes," *Sustainability*, vol. 15, no. 12, 2023.
- [8] W. C. P. Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, S. H. Kosmatka, dan B. Kerkhoff, *Design and Control Design and Control of Concrete Mixtures, 24th edition*. Chicago: Portland Cement Association, 2002.
- [9] D. P. Bentz dan C. F. Ferraris, "Rheology and setting of high volume fly ash mixtures," *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, no. 4, hal. 265–270, 2010.
- [10] Y. Wang, J. Wu, L. Su, L. Zhang, Z. Wang, Z. Lei, T. Lu, X. Ye, dan Z. Ye, "Effect of Chemical Admixtures on the Working Performance and Mechanical Properties of Cement-Based Self-Leveling Mortar," *Buildings*, vol. 13, no. 9, hal. 1–17, 2023.

- [11] R. Snellings, G. Mertens, dan J. Elsen, "Supplementary cementitious materials," *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, vol. 74, no. December 2013, hal. 211–278, 2012.
- [12] M. Schneider, M. Romer, M. Tschudin, dan H. Bolio, "Sustainable cement production-present and future," *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 7, hal. 642–650, 2011.
- [13] A. Hasanbeigi, L. Price, H. Lu, dan W. Lan, "Analysis of energy-efficiency opportunities for the cement industry in Shandong Province, China: A case study of 16 cement plants," *Energy*, vol. 35, no. 8, hal. 3461–3473, 2010.
- [14] R. Gao, L. Wang, dan R. Teti, "Cloud-enabled prognosis for manufacturing," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 64, no. 2, hal. 749–772, 2015.
- [15] B. Wang, K. A. Lucy, J. S. Schuman, I. A. Sigal, R. A. Bilonick, C. Lu, J. Liu, I. Grulkwski, Z. Nadler, H. Ishikawa, L. Kagemann, J. G. Fujimoto, dan G. Wollstein, "Tortuous Pore Path Through the Glaucomatous Lamina Cribrosa," *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, 2018.
- [16] P. Managers, "Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making Energy Efficiency Improvement and Cement Making," *Energy Star*, no. 430, 2013.
- [17] A. Atmaca dan R. Yumrutaş, "Analysis of the parameters affecting energy consumption of a rotary kiln in cement industry," *Applied Thermal Engineering*, vol. 66, no. 1–2, hal. 435–444, 2014.
- [18] E. Benhelal, G. Zahedi, E. Shamsaei, dan A. Bahadori, "Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 51, hal. 142–161, 2013.