

Potensi Pengolahan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun di Industri Semen

Andini Siti Rohmana, Gina Lova Sari*

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Singaperbangsa Karawang, Jawa Barat Indonesia

*Koresponden email: ginalovasari@gmail.com

Diterima: 29 Juli 2024

Disetujui: 6 Agustus 2024

Abstract

Cement production has the potential to increase greenhouse gas (GHG) emissions, particularly carbon dioxide (CO₂) emissions. The cause of CO₂ produced by the cement industry is reported to come from two sources, namely the combustion process in the kiln and the calcination process in the clinker making process. The large amount of CO₂ gas produced in the production process puts pressure on every cement industry to try to find alternative fuels and raw materials to maintain or reduce CO₂ emissions. One of the alternative raw materials that can be used as a source of fuel and alternative raw materials is hazardous and toxic waste with certain criteria. This study is an observational study, in which the cement production process and waste management in one of the cement industries are observed to obtain primary data in the form of the types of waste used. Internal waste is used as a substitute for raw materials and fuel substitutes. The process of waste utilisation in the cement industry is carried out by co-processing. The process of waste utilisation requires control, so each activity must be monitored. The results show that the cement products resulting from the process of using waste as a raw material substitute are of good quality and meet the criteria contained in the Annex to Ministerial Regulation No. 6 of 2021.

Keywords: *waste, cement, co-processing, raw material substitution, fuel substitution*

Abstrak

Produksi semen berpotensi menaikkan emisi gas rumah kaca (GRK) yang dihasilkan khususnya emisi karbon dioksida (CO₂). Penyebab CO₂ yang dihasilkan oleh industri semen diindikasikan berasal dari dua sumber yaitu proses pembakaran pada kiln dan kalsinasi pada proses pembuatan klinker. Besarnya gas CO₂ yang dihasilkan dalam proses produksi menekan setiap industri semen untuk berupaya mencari bahan bakar dan bahan baku alternatif untuk mempertahankan atau mengurangi emisi CO₂. Salah satu bahan baku alternatif yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber bahan bakar dan bahan baku alternatif yaitu limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) dengan kriteria tertentu. Penelitian ini merupakan studi observasional yang dilakukan dengan mengamati proses produksi semen dan pengolahan limbah B3 pada salah satu industri semen untuk memperoleh data primer berupa jenis limbah yang digunakan. Limbah B3 internal dimanfaatkan sebagai substitusi bahan baku dan substitusi bahan bakar. Proses pemanfaatan limbah B3 pada industri semen dilakukan dengan cara co-processing. Proses pemanfaatan limbah B3 membutuhkan pengawasan sehingga setiap kegiatan harus dilakukan pemantauan. Hasil menunjukkan produk semen yang dihasilkan dari proses pemanfaatan limbah B3 untuk substitusi bahan baku memiliki kualitas yang baik dan memenuhi kriteria yang terdapat pada lampiran Peraturan Menteri No.6 tahun 2021.

Kata Kunci: *limbah B3, semen, co-processing, substitusi bahan baku, substitusi bahan bakar*

1. Pendahuluan

Industri semen memainkan peran yang sangat penting dalam perekonomian global karena berkontribusi dalam berbagai pembangunan infrastruktur dan konstruksi (Utami dan Syarifudin, 2018). Menurut data survei yang dilakukan oleh *U.S. Geological Survey* (2024) total keseluruhan produksi semen di dunia pada tahun 2023 mencapai 4,10 miliar metrik ton. Tiongkok menjadi negara produsen semen terbesar dengan total produksi pada tahun 2023 sebesar 2,10 Miliar metrik ton sedangkan Indonesia, berada di urutan ke-9 dengan total produksi mencapai 62,00 juta metrik ton (*U.S Geological Survey*, 2024). Besarnya produksi semen dapat disebabkan oleh tingginya permintaan pasar akibat dampak dari meningkatnya pembangunan infrastruktur seperti pembangunan jembatan, gedung, jalan tol dan infrastruktur lainnya (Maha *et al*, 2022).

Bersamaan dengan meningkatnya produksi semen maka potensi emisi Gas Rumah Kaca (GRK) yang dihasilkan khususnya emisi karbon dioksida (CO₂) juga semakin tinggi. Berdasarkan Tkachenko *et al*. (2023) salah satu penghasil CO₂ terbesar di dunia adalah industri semen dimana menyumbang lebih dari

7,00% total anggaran GRK dunia. Penyebab CO₂ yang dihasilkan oleh industri semen diindikasikan berasal dari dua sumber yaitu proses pembakaran pada kiln dan kalsinasi pada proses pembuatan klinker. Lebih lanjut, Abdul-Wahab *et al.* (2021) menjelaskan bahwa 50,00% dari total emisi berasal dari proses kalsinasi batu kapur dan sekitar 40,00% berasal dari bahan bakar yang digunakan dalam proses pembakaran. Besarnya gas CO₂ yang dihasilkan dalam proses produksi menekan setiap industri semen untuk berupaya mencari bahan bakar dan bahan baku alternatif untuk mempertahankan atau mengurangi emisi CO₂. Salah satu bahan baku alternatif yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber bahan bakar dan bahan baku alternatif yaitu limbah berbahaya dan beracun (B3) dengan kriteria tertentu.

Pemanfaatan limbah B3 hanya bisa dilakukan oleh pihak yang mendapatkan izin untuk mengolahnya sebagai substitusi bahan baku dan substitusi bahan bakar. Limbah B3 berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku dan bahan bakar alternatif dalam proses produksi semen dengan memanfaatkan temperatur tinggi pada fasilitas kiln atau yang disebut *co-processing*. Berdasarkan Peraturan Menteri Perindustrian Nomor 12 Tahun 2012 *co-processing* merupakan salah satu bentuk upaya untuk menurunkan gas rumah kaca pada industri semen. Lebih lanjut, Aznury (2022) menjelaskan bahwa *co-processing* merupakan proses pengolahan limbah B3 yang ramah lingkungan karena tidak menghasilkan residu. Selain itu, pengolahan limbah B3 menggunakan *co-processing* dapat meningkatkan efisiensi energi yang digunakan. Berdasarkan masalah dan potensi yang telah diuraikan maka tujuan penelitian ini adalah untuk mengkaji potensi pengolahan limbah B3 menggunakan *co-processing* pada fasilitas kiln pada industri semen.

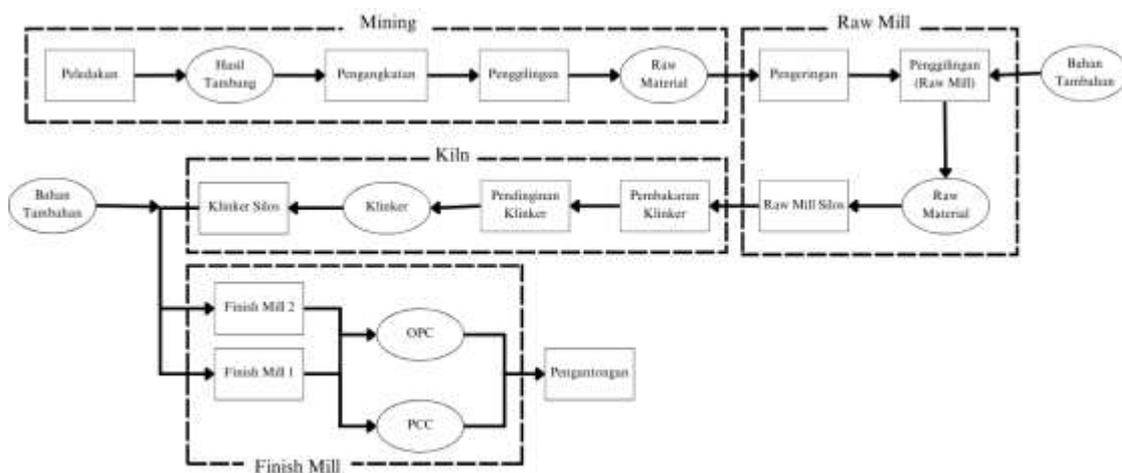
2. Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan studi observasional yang dilakukan dengan mengamati proses produksi semen dan pengolahan limbah B3 pada salah satu industri semen untuk memperoleh data primer berupa jenis limbah yang digunakan. Penelitian juga dilakukan wawancara dan studi literatur untuk mendapatkan informasi pendukung terkait dengan proses pemanfaatan limbah B3.

3. Hasil Dan Pembahasan

Proses pembuatan semen

Pembuatan semen terdiri atas penyiapan bahan baku, *grinding*, homogenisasi, pencampuran varian komponen, fase pemanasan, *grinding klinker*, dan *packaging*. Proses produksi semen terdapat pada Gambar 1.



Gambar 1. Proses Produksi Semen
Sumber : Nugraha *et al.* (2018)

Bahan baku utama pembuatan semen yaitu batu kapur dan tanah liat. Selain itu, terdapat pasir silika dan pasir besi yang digunakan sebagai bahan pengoreksi komposisi. Bahan utama pembuatan semen didapatkan melalui proses pertambangan dengan menggunakan peledak. Hasil tambang kemudian diangkut menggunakan *dump truck* menuju mesin penggilingan untuk menyesuaikan dengan spesifikasi titik umpan. Bahan baku yang sudah memenuhi spesifikasi akan menuju ke tempat penyimpanan untuk dilakukan proses pencampuran batu kapur dan tanah liat.

Proses selanjutnya bahan baku dan bahan pengoreksi akan dimasukkan ke dalam mesin *Raw mill* untuk dilakukan penggilingan, pemanasan dan pencampuran. Bahan baku yang sudah memenuhi spesifikasi kehalusan material hingga 90 mikron (Maha *et al*, 2022) akan dimasukkan ke dalam *Raw mill silo* sebelum diumpungkan ke dalam kiln melalui *kiln feed*. Proses pembakaran bahan baku pembuatan klinker pada fasilitas kiln terbagi atas empat zona. Zona pertama yaitu *calcining zone* dimana bahan baku dipanaskan pada suhu 1200°C. Zona kedua yaitu *Transition zone*, pada zona ini bahan baku akan mengalami reaksi CaO dengan unsur SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O₃ pada suhu 1500°C. Zona ketiga proses pemanasan bahan baku mencapai suhu 1800°C yang mengakibatkan seluruh material meleleh dan membentuk senyawa utama pembuatan klinker. Selanjutnya bahan baku akan masuk ke dalam *cooling zone* dimana material akan mengalami penurunan suhu kurang dari 1200°C. Bahan baku yang sudah berbentuk klinker akan didinginkan di dalam *grate cooler* hingga suhu 100-200°C sebelum disimpan dalam klinker silo (Fabrianto, 2022).

Klinker yang disimpan di dalam silo akan dimasukkan ke dalam *finish mill* sebagai proses penggilingan akhir dan menghasilkan semen dengan jenis OPC dan PCC disimpan dalam semen silo. Semen selanjutnya dikeluarkan dari semen silo menuju packer tank untuk dilakukan proses pengemasan (Fabrianto, 2022).

Pemanfaatan limbah B3

Industri semen dalam proses produksinya juga menghasilkan berbagai macam limbah, termasuk limbah B3. Limbah B3 dapat berasal dari proses produksi, laboratorium, dan kantor. Informasi mengenai limbah B3 yang umumnya dihasilkan oleh industri semen dapat dilihat pada **Tabel 1**.

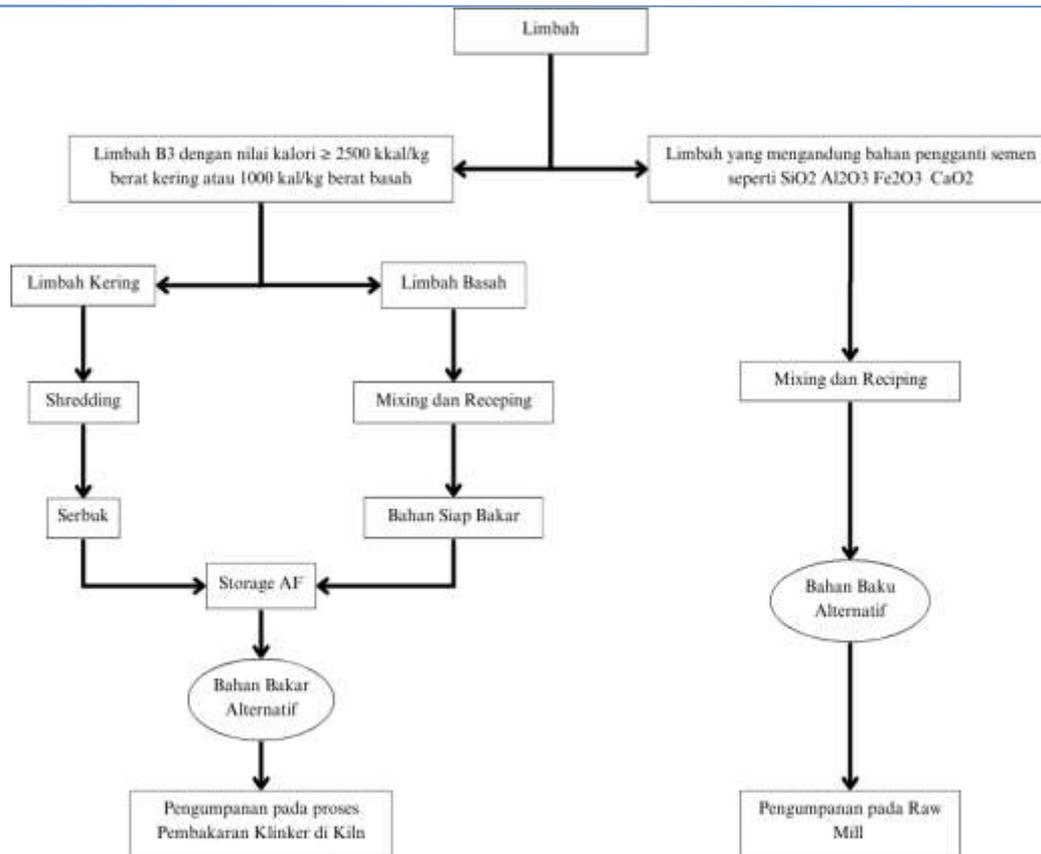
Tabel 1. Daftar Limbah B3 yang dihasilkan dari Proses Produksi Semen

No	Limbah B3	Kode Limbah	Sumber	Potensi Pemanfaatan
1	Pelumas Bekas	B105d	Mesin pabrik	Substitusi sumber energi
2	Majun bekas	B110d	Pemeliharaan mesin pabrik	Substitusi sumber energi
3	Kemasan bekas	B353-1	Laboratorium dan mesin pabrik	Substitusi sumber energi
4	Filter bekas pengendalian pencemaran udara	B109d	Pemeliharaan mesin pabrik	Substitusi sumber energi
5	Fly ash	B409	Dari pembakaran batu bara	Substitusi bahan baku
6	Bottom ash	B410	Dari pembakaran batu bara	Substitusi bahan baku
7	Refraktori Bekas	A417	Pemeliharaan mesin kiln pabrik	Substitusi bahan baku

Tabel 1 menunjukkan bahwa terdapat beberapa limbah B3 dari proses produksi semen bisa dimanfaatkan kembali sebagai substitusi bahan baku dan substitusi bahan bakar. Sementara itu, sesuai dengan Peraturan Menteri No.6 Tahun 2021 limbah yang tidak bisa dimanfaatkan akan diberikan kepada pihak ke-3. Limbah B3 tersebut dikecualikan karena tidak dapat dimusnahkan, berbahaya untuk operasional pabrik semen, pekerja dan lingkungan hidup disekitar pabrik. Limbah B3 yang dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif yaitu limbah yang dapat menghasilkan panas dan energi, dimana memiliki kandungan kalori lebih besar atau sama dengan 2.500,00 kkal/kg, berat kering atau 1.000,00 kkal/kg berat basah.

Limbah B3 padat memiliki kandungan sulfur paling tinggi 1,00% berat kering, dan memenuhi standar baku mutu dan lingkungan hidup sesuai dengan Peraturan Menteri No.6 tahun 2021. Sedangkan limbah B3 yang dimanfaatkan sebagai substitusi bahan baku harus memiliki sifat atau fungsi yang sama dengan semen yaitu mengandung bahan kimia CaO (oksida kalsium), SiO₂ (oksida silium), Al₂O₃ (Oksida aluminium), Fe₂O₃ (Oksida Besi). Selanjutnya limbah yang akan dimanfaatkan sebagai substitusi bahan bakar dan substitusi bahan baku akan dilakukan proses shredding, mixing dan riciping. Proses pengolahan limbah B3 sebagai substitusi bahan baku dan bahan bakar terdapat pada **Gambar 2**.

Limbah B3 yang akan dimanfaatkan sebagai substitusi sumber energi dan substitusi bahan baku alternatif akan melalui proses pendataan untuk mengetahui nilai energi dan nilai materialnya. Selanjutnya limbah B3 akan melalui proses persiapan awal. Persiapan awal terdiri atas *shredding*, *receiving* dan *mixing*. Limbah B3 kering akan dilakukan proses penyesuaian ukuran sesuai dengan spesifikasi titik penyimpanan limbah B3. Proses selanjutnya yaitu proses pencampuran lebih dari dua jenis limbah B3 sehingga hasil dari pencampuran tersebut menghasilkan limbah dengan nilai energi baru dan relatif stabil.



Gambar 2. Proses Pemanfaatan Limbah B3 sebagai Substitusi Bahan Baku dan Substitusi Sumber Energi

Limbah B3 yang sudah dicampurkan akan dilakukan uji laboratorium dimana limbah B3 harus memenuhi parameter total logam untuk limbah B3 yang dimanfaatkan sebagai substitusi bahan bakar dan nilai kandungan oksida sebagai substitusi bahan baku. Berdasarkan Peraturan menteri LHK No.6 Tahun 2021 kriteria limbah B3 yang harus dipenuhi sebelum dimasukkan pada titik umpan untuk pemanfaatannya sebagai substitusi bahan bakar terdapat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Kriteria Limbah B3 Padat untuk Substitusi Bahan Bakar

No	Parameter	Unit	Kriteria	Hasil	
				Padat	Cair
1	Arsen (As)	Ppm	Max. 5,00	0,20	1,15
2	Kadmium (Cd)	Ppm	Max. 2,00	0,42	0,83
3	Kromium (Cr)	Ppm	Max. 1.500,00	592,03	6,82
4	Timbal (Pb)	Ppm	Max. 100,00	33,89	0,97
5	Merkuri (Hg)	Ppm	Max. 1,20	0,28	0,0001
6	PCBs	Ppm	Max. 2,00	0,00	0,00
7	Kadar total organik halida (TOX) sebagai Fluorida (F) dan Klorida (Cl)	%	Max. 2,00	0,22	0,13
8	Nilai Kalori	Kkal/kg berat kering atau kal/kg berat basah	Min. 2.500,00	4.136,50	9.008,00

Sumber : Peraturan Pemerintah LHK No.6 Tahun 2021

Hasil pengujian kandungan limbah B3 yang akan dimanfaatkan sebagai substitusi bahan bakar pada **Tabel 2** telah menunjukkan nilai yang memenuhi Peraturan Menteri LHK No.6 Tahun 2021 baik untuk limbah B3 cair maupun limbah B3 padat. Semakin tinggi nilai kalori pada limbah B3 yang dimanfaatkan sebagai substitusi sumber energi maka akan semakin banyak panas yang dihasilkan sehingga dapat menurunkan konsumsi panas spesifik untuk setiap produk klinker yang dihasilkan. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Aziz *et al.* (2019) semakin tinggi nilai kalori yang dihasilkan maka akan semakin lama waktu pembakarannya. Lebih lanjut Aznury (2022) dalam penelitiannya juga menambahkan bahwa penggunaan bahan bakar alternatif dapat menurunkan jumlah konsumsi pemakaian bahan bakar.

Nilai kandungan oksida yang harus dipenuhi dalam menggunakan limbah B3 sebagai substitusi bahan baku yaitu memenuhi syarat $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + CaO_2 \geq 50\%$ (lebih besar atau sama dengan lima puluh persen). Hasil uji nilai kandungan oksida pada limbah B3 yang akan dimanfaatkan sebagai substitusi bahan baku terdapat pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Nilai Oksida Pada Limbah B3

No	Parameter	Unit	Kriteria	Hasil
1	SiO ₂	%	-	42,72
2	Al ₂ O ₃	%	-	12,50
3	Fe ₂ O ₃	%	-	9,87
4	CaO	%	-	7,81
5	Total CaO + SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	%	Min. 50	75,20

Pemanfaatan limbah B3 sebagai substitusi bahan baku semen maka harus memiliki fungsi dan kandungan bahan kimia yang sama untuk proses pembuatan semen. Amelia *et al.* (2022) menjelaskan bahwa komposisi kimia pada semen yaitu CaO (oksida kalsium), SiO₂ (oksida silisium), Al₂O₃ (Oksida aluminium), Fe₂O₃ (Oksid Besi). Berdasarkan Peraturan Menteri LHK No. 6 Tahun 2021 limbah B3 yang dimanfaatkan sebagai substitusi bahan baku harus memiliki sifat atau fungsi yang sama dengan bahan baku utamanya. Menyuru pada Tabel 3 diketahui bahwa hasil nilai oksida limbah B3 yang akan diumpangkan pada *raw mill* sudah memenuhi parameter yang terdapat pada Peraturan Menteri LHK No. 6 Tahun 2021 yaitu 75,20%.

Selain itu, limbah B3 yang dimanfaatkan sebagai substitusi bahan baku juga memenuhi ketentuan konsentrasi logam sesuai dengan Peraturan Menteri LHK No.6 Tahun 2021. Parameter yang harus dipenuhi terdapat pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Total Konsentrasi Logam Limbah B3 untuk Substitusi Bahan Baku

No	Parameter	Satuan	Kriteria	Hasil
1	Arsen (As)	mg/kg	Max. 200,00	5,54
2	Timbal (Pb)	mg/kg	Max. 1000,00	33,54
3	Kadmium (Cd)	mg/kg	Max. 70,00	3,43
4	Krom total (Cr)	mg/kg	Max. 1500,00	171,72
5	Kobalt (Co)	mg/kg	Max. 200,00	9,88
6	Tembaga (Cu)	mg/kg	Max. 1000,00	40,62
7	Nikel (Ni)	mg/kg	Max. 1000,00	134,91
8	Merkuri (Hg)	mg/kg	Max. 5,00	1,45
9	Selenium (Se)	mg/kg	Max. 50,00	31,31
10	Seng (Zn)	mg/kg	Max. 5000,00	1.147,23

Sumber : Permen LHK No.6 tahun 2021

Hasil uji total konsentrasi logam limbah B3 untuk substitusi bahan baku pada **Tabel 4** masih memenuhi batas atas dari konsentrasi logam-logam berat sesuai dengan Peraturan Pemerintah LHK No.6 tahun 2021. Kandungan logam limbah B3 sangat berpengaruh terhadap kualitas dari semen yang dihasilkan. Logam berat kemungkinan dapat mempengaruhi kemampuan semen untuk mengikat agregat atau zat adiktif lainnya sehingga mempengaruhi kualitas semen. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Widhiastuti (2020), diketahui bahwa penambahan limbah logam berpengaruh terhadap kuat tekan beton dimana beton yang tidak dicampurkan dengan limbah logam memiliki kuat tekan 11.660,00 Mpa sedangkan beton yang ditambahkan dengan limbah logam hanya memiliki kuat tekan 5.830,00 Mpa. Murat dan Sorrentino (1996); serta Wang dan Vipulanandan (1996) menjelaskan bahwa penambahan logam berat pada klinker akan mempengaruhi kuat tekan semen. Lebih lanjut, Tashiro *et al.* (1997) melakukan penelitian terhadap pengaruh logam berat pada proses pengerasan semen. Hasil dari penelitian tersebut didapati bahwa Zn, Pb, dan Cu dengan kadar 25,00% menghambat pengerasan awal pada semen. Berdasarkan hal tersebut, pengujian total logam pada limbah B3 yang akan dimanfaatkan sebagai substitusi bahan baku perlu dilakukan untuk mempertahankan kualitas dari produk yang dihasilkan.

Limbah B3 yang sudah memenuhi kriteria selanjutnya dibawa dengan menggunakan *dump truck* menuju titik pengumpanan. Titik pengumpanan substitusi bahan bakar terbagi menjadi dua yaitu di prakalsier untuk reaSaksi kalsinasi dan melalui pembakaran/kiln utama pada outlet tanur putar untuk reaksi klinkerisasi. Sebagian kecil dari total kebutuhan energi juga dapat ditambahkan pada saluran masuk tanur putar yang disebut pembakaran sekunder. Selama proses pengumpanan limbah B3 harus selalu dilakukan pengawasan terhadap massa yang akan diumpangkan agar limbah B3 yang dimanfaatkan sebagai substitusi

bahan bakar terbakar dengan sempurna. Sedangkan limbah B3 yang dimanfaatkan sebagai substitusi bahan baku akan diumpungkan ke fasilitas kiln melalui *raw mill* untuk proses pembuatan klinker.

Produk hasil dari pemanfaatan limbah B3 sebagai substitusi bahan baku harus melakukan uji laboratorium dimana limbah B3 harus memenuhi mutu produk sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) atau standar lain yang setara. Melakukan uji toxicity characteristic leaching procedure (TCLP) untuk parameter Arsen (As), Kadmium (Cd), Krom valensi enam (Cr6+), Tembaga (Cu), Timbal (Pb), Merkuri (Hg), Nikel (Ni), Selenium (Se), dan Seng (Zn) dengan hasil uji lebih kecil dari TCLP-B sebagaimana tercantum pada Lampiran XII Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup yang berlaku. Hasil pengujian standar Nasional Indonesia pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Uji Standar Nasional Indonesia Semen Portland Tipe II

Syarat Kimia				
No	Parameter	Satuan	Kriteria	Hasil
1	Silicon Dioxide (SiO ₂)	%	Min. 20,00	20,20
2	Aluminium Oxide (Al ₂ O ₃)	%	Max. 6,00	4,50
3	Ferric Oxide (Fe ₂ O ₃)	%	Max. 6,00	4,52
4	Magnesium Oxide (MgO)	%	Max. 6,00	1,60
5	Sulfur Trioxide (SO ₃)	%	Max. 6,00	2,26
6	Hilang Pijar	%	Max. 3,00	1,50
7	Bagian Tak Terlarut	%	Max. 1,50	0,61
8	C ₃ S	%	-	-
9	C ₂ S	%	-	-
10	C ₃ A	%	Max. 8,00	4,00
11	C ₄ AF + 2 C ₃ A and C ₄ AF + C ₂ F	%	-	-
12	(C ₃ A + 2 C ₃ A)	%	Max. 58,00	22,00
13	Alkali (Na ₂ O + 0,658 K ₂ O)	%	Max. 0,60	0,51
Syarat Fisika				
14	Kehalusan Uji permeabilitas udara dengan alat :			
	- Turbidimeter		Min. 160,00	-
	- Baline	m ² /kg	Min. 280,00	346,00
15	Kekekalan: Pemuaian dengan autoclave	%	Max. 0,80	0,00
16	Kuat tekan:			
	Umur 1 hari	Kg/cm ²	-	-
	Umur 3 hari	Kg/cm ²	Min. 100,00	221,00
	Umur 7 hari	Kg/cm ²	Min. 175,00	282,00
	Umur 28 hari	Kg/cm ²	-	395,00
17	Waktu pengikatan (metode alternatif) dengan alat :			
	Gilmore			
	- Awal			
	- Akhir	Menit	Min. 60,00	-
		Menit	Max. 600,00	-
	Vicat			
	- Awal	Menit	Min. 45,00	145,00
	- Akhir	Menit	Max. 375,00	295,00

Sumber : SNI 2049:2015

Syarat kimia dan fisik pada hasil uji dengan menggunakan Standar Nasional Indonesia (SNI) masih memenuhi parameter. Pengujian dengan menggunakan SNI ini untuk memastikan kualitas produk semen yang dihasilkan memenuhi kualitas tertentu walaupun menggunakan limbah B3 sebagai substitusi bahan baku. Berdasarkan **Tabel 5** kehalusan semen diukur dengan menggunakan alat *blaine air permeability*. *Blaine air permeability* yaitu cara untuk mengukur tingkat kehalusan semen berdasarkan luas bidang per satuan berat (gram/cm² atau m²/kg). Hasil dari uji kehalusan pada semen yang dihasilkan yaitu 346,00 m²/kg dimana sudah memenuhi parameter yang ditentukan yaitu minimal 280,00 m²/kg. Kehalusan semen dapat mempengaruhi waktu ikat dan kuat tekan mortar. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Slat *et al.* (2016) untuk menguji kuat tekan pada mortar berdasarkan butir semen kehalusannya didapati bahwa

waktu ikat pada semen dengan kehalusan 600 m²/kg lebih cepat dan nilai kuat tekan spesimen meningkat 22,45% jika dibandingkan dengan kehalusan semen 400 m²/kg hanya memiliki kuat tekan 8,04%

Proses selanjutnya yaitu melakukan uji TCLP pada produk semen. Uji TCLP adalah uji pelindian senyawa-senyawa berbahaya seperti logam berat yang berpotensi mencemari lingkungan. Semen yang memanfaatkan limbah B3 sebagai substitusi bahan baku uji TCLP sangat penting untuk menilai potensi pencemaran, memastikan kepatuhan regulasi, perlindungan kesehatan publik. Hasil uji TCLP yang dilakukan pada produk semen hasil pemanfaatan limbah B3 sebagai substitusi bahan baku terdapat pada **Tabel 6**.

Tabel 6. Uji TCLP Pada Semen

No	Parameter	Satuan	Kriteria	Hasil
1	Ag	Ppm	Max. 5,00	0,0057
2	Ni	Ppm	Max. 3,50	0,0064
3	Cu	Ppm	Max. 10,00	0,0063
4	Zn	Ppm	Max. 50,00	0,0025
5	As	Ppm	Max. 0,50	0,0323
6	Cd	Ppm	Max. 0,15	0,0017
7	Hg	Ppm	Max. 0,05	0,0001
8	Pb	Ppm	Max. 0,50	0,0245
9	Se	Ppm	Max. 0,50	0,0424

Berdasarkan **Tabel 6** diatas berdasarkan uji TCLP didapati bahwa memenuhi seluruh parameter sesuai dengan baku mutu TCLP B pada lampiran XII PP No. 22 tahun 2021. Berdasarkan pada **Tabel 6** terjadi penurunan kadar logam total pada semen dibandingkan dengan total kandungan logam sebelum dilakukan proses pengolahan. Utomo dan Laksono (2007) menjelaskan bahwa nilai Ph yang basa diakibatkan oleh kemampuan semen untuk menetralkan asam sehingga semen mampu menekan mobilitas logam. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Alfiadi & Slamet (2022) beton dengan bahan campuran limbah B3 dan semen tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada logam Cu pada setiap sampel sehingga aman dari potensi pelindian logam berat yang rendah. yang melakukan penelitian berdasarkan terjadi proses stabilisasi/stabilisasi pada limbah sehingga dapat menurunkan potensi unsur logam untuk mencemari lingkungan (Aprida, 2018). Lebih lanjut, penelitian yang dilakukan oleh Muzayyanah (2021) setelah dilakukan proses pengolahan parameter nilai limbah B3 untuk unsur logam slag aluminium mengalami penurunan akibat proses stabilisasi/stabilisasi.

4. Kesimpulan

Limbah B3 hasil produksi semen seperti pelumas bekas, majun bekas, kemas bekas, filter bekas pengendali pencemaran udara, *fly ash*, *bottom ash*, dan refraktori bekas dapat dimanfaatkan kembali sebagai substitusi bahan baku dan substitusi bahan bakar. Limbah B3 akan melalui proses pendataan nilai energi dan material, pencacahan, penggabungan dan campuran. Limbah B3 yang dimanfaatkan untuk substitusi bahan baku dan bahan bakar harus memenuhi kriteria total konsentrasi logam sesuai dengan Permen LHK No.6 tahun 2021. Namun, produk hasil dari memanfaatkan limbah B3 sebagai substitusi bahan baku harus dilakukan uji laboratorium kembali untuk memenuhi mutu produk sesuai Standar Nasional Indonesia serta *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP).

5. Referensi

- [1] Abdul-Wahab, S. A., Al-Dhamri, H., Ram, G., & Chatterjee, V. P. (2021). An overview of alternative raw materials used in cement and clinker manufacturing. *International Journal of Sustainable Engineering*, 14(4), 743-760.
- [2] Nugraha, A. Z., Wiloso, E. I., & Yani, M. (2018). Pemanfaatan serbuk gergaji sebagai substitusi bahan bakar pada proses pembakaran-kiln di pabrik semen dengan pendekatan life cycle assesment (lca). *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan (Journal of Natural Resources and Environmental Management)*, 8(2), 188-198.
- [3] Andhika Pratama, N. (2023). *Perancangan Interior Kantor Depzhartemen Design & Engineering Pt Semen Indonesia* (Doctoral dissertation, Institut Seni Indonesia Yogyakarta).
- [4] Baidya, R., & Ghosh, S. K. (2019). Low carbon cement manufacturing in India by co-processing of alternative fuel and raw materials. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 41(21), 2561-2572.

- [5] Survei Geologi AS, 2024, Cement Statistics and Infomarmastion, diakses pada 18 Juli 2024 di URL <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/cement-statistics-and-information>.
- [6] Febrianto, M. A., Umbara, N. B., & Safaruddin, S. (2022). Dampak Perkembangan Dan Proses Pembuatan Semen Pada Pt. Semen Baturaja. *Jurnal Multidisipliner Bharasumba*, 1(04), 619-639.
- [7] Fitriyanti, R., & Fatimura, M. (2019). Aplikasi produksi bersih pada industri semen. *Jurnal Redoks*, 4(1), 10-15.
- [8] Kampmann, D., Hickey, C., Bayaraa, M., Foster, P., Layman11, C., Rossi, C., ... & Caldecott, B. Global database of cement production assets and upstream suppliers.
- [9] Katadata. (2022, Februari 14). 10 negara produsen semen terbesar dunia, Tiongkok juaranya. Databoks. Diakses 28 Juni 2024, dari <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2022/02/14/10-negara-produsen-semen-terbesar-dunia-tiongkok-juaranya>.
- [10] Tkachenko, N., Tang, K., McCarten, M., Reece, S., Kampmann, D., Hickey, C., ... & Caldecott, B. (2023). Global database of cement production assets and upstream suppliers. *Scientific Data*, 10(1), 696.
- [11] D U.S. Geological Survey. (2024). *Mineral commodity summaries 2024*. Diakses 28 Juni 2024, dari <https://www.usgs.gov/centers/nmic/mineral-commodity-summaries>.
- [12] Zhang, C. Y., Yu, B., Chen, J. M., & Wei, Y. M. (2021). Green transition pathways for cement industry in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 166, 105355.
- [13] Zhang, J., Liu, G., Chen, B., Song, D., Qi, J., & Liu, X. (2014). Analysis of CO2 emission for the cement manufacturing with alternative raw materials: a LCA-based framework. *Energy Procedia*, 61, 2541-2545.
- [14] Abbad, R. S. (2022). *Laporan Pelaksanaan Magang Di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Pabrik Tuban Analisis Pengelolaan Dan Pemanfaatan Limbah Bahan Berbahaya & Beracun Pada Pt Semen Indonesia (Persero) Tbk. Pabrik Tuban* (Doctoral dissertation, Universitas Airlangga).
- [15] Maha, A. Q., IkesT, M. P., Garmini, R., & Syabana, M. (2022). Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya Dan Beracun (B3) Di Pt. Semen Baturaja (PERSERO) Tbk. *Jurnal terapan internship & multidisiplin E-ICN*, 5474, 2962.
- [16] Utami, K. T., & Syafrudin, S. (2018). Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya Dan Beracun (B3) Studi Kasuspt. Holcim Indonesia, Tbk Narogong Plant. *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi Dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 15(2), 127-132.
- [17] Permatasari, R. (2024). Studi analisis manfaat limbah fly ash pada industri bahan baku semen. *Energy Justice*, 1(1), 40-50.
- [18] Maha, A. Q., IkesT, M. P., Garmini, R., & Syabana, M. (2022). Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya Dan Beracun (B3) Di Pt. Semen Baturaja (Persero) Tbk. *Jurnal terapan internship & multidisiplin E-ICN*, 5474, 2962.
- [19] Aznury, M. (2022). Analisis Penggunaan Limbah B3 Spent Bleaching Earth Sebagai Bahan Bakar Alternatif di PT. Semen Baturaja (Persero) TBK: Limbah B3, Spent Bleaching Earth (SBE), Bahan Bakar Alternatif, Rotary Kiln, Clinker. *Kinetika*, 13(03), 49-55.
- [20] Aziz, M. R., Siregar, A. L., Rantawi, A. B., & Rahardja, I. B. (2019). Pengaruh Jenis Perekat Pada Briket Cangkang Kelapa Sawit Terhadap Waktu Bakar. *Prosiding Semnastek*.
- [21] Firman, F. (2020). Analisis Kandungan Logam Berat Abu Batubara PLTU Bangko Barat Kab. Muara Enim Sumatera Selatan. *Journal Of Science And Engineering*, 3(1), 10-16. <https://ejournal.unkhair.ac.id/index.php/josa e/article/view/2070>.
- [22] Tashiro, C. Takahashi, H. Kanaya, M. Hirakida, I. and YOSHIDA, R. (1977) Hardening property of cement mortar adding heavy metal compound and solubility if heavy metal from hardened mortar, *Cement and Concrete Research*.
- [23] Amelia, M. P., Safaruddin, S., & Muzzaki, M. M. (2022). Analisis Prosedur Pembuatan Semen Pada Pt. Semen Baturaja. *Jurnal Multidisipliner Bharasumba*, 1(04), 512-522.
- [24] Slat, V. B., Sumajouw, M. D. J., & Wallah, S. E. (2017). Pengaruh Kehalusan Semen Terhadap Peningkatan Kekuatan Mortar. *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 6(3).
- [25] Wang, S.Y., and Vipulanandan, C. (1996) Leachability of lead from solidification cementfly ash binders, *Cement and Concrete Research*.
- [26] Murat, M. and Sorrentino, F. (1996) Effect of large additions of Cd, Pb, Cr, Zn to cement raw meal on the composition and the properties of the clinker and the cement, *Cement and Concrete Research*.
- [27] Muzayyanah, N. (2021). Pemanfaatan Limbah Abu Aluminium Sebagai Substitusi Semen Dalam Pembuatan Paving Block.

-
- [28] Widhiastuti, Y. (2020). Pengaruh Penambahan Limbah Logam Sebagai Bahan Pengganti Sebagian Agregat Halus Terhadap Kuat Tekan Beton. *Jurnal Teknik Sipil*, 5(1), 61-72.
- [29] Utomo, M.P dan Laksono, E.W. (2007). Kajian Tentang Proses Solidifikasi/Stabilisasi Logam Berat dalam Limbah dengan Semen Portland. Prosiding Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan dan Penerapan MIPA. 103-109.
- [30] Alifiadi, R., & Slamet, A. (2022). Utilization of Sandblasting Waste as an Alternative Material for Paving Blocks. *Jurnal Multidisiplin Madani*, 2(12), 4399-4407.
- [31] Aprida L F. (2018). Pemanfaatan Kandungan CaO Limbah Karbit dan Kandungan Silika Abu Sekam Padi sebagai Bahan Pembuatan Bata Beton Pejal. Laporan Tugas Akhir. Teknik Pengolahan Limbah. Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.