

Analisis Potensi Pencemaran Limbah Ferri oksida pada Mortar Semen Berdasarkan Uji TCLP

Affatul Faizah¹, Denny Dermawan^{1*}, Wiwik Dwi Pratiwi¹

¹Program Studi Teknik Pengolahan Limbah, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya 60111

*E-mail: denny.dermawan@ppns.ac.id

Abstrak

Pemanfaatan limbah industri sebagai bahan tambahan mortar merupakan langkah strategis untuk mendukung pembangunan berkelanjutan. Penelitian ini menganalisis potensi pencemaran logam berat dari mortar semen yang mengandung ferri oksida dan *fly ash* melalui uji *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP). Uji kuat tekan menunjukkan bahwa variasi 30% ferri oksida dengan *fly ash* 30% memiliki nilai sebesar 35,05 MPa, sedangkan kontrol (0% ferri oksida dengan *fly ash* 30%) mencapai 43,02 MPa, kedua variasi memenuhi standar minimum ACI 530.1/ASCE 6/TMS 602. Hasil uji TCLP menunjukkan bahwa konsentrasi logam berat berada jauh di bawah ambang batas PP No. 22 Tahun 2021, pada logam Zn sebesar <0,747 mg/L, Ni <0,034 mg/L, Ba <1,416 mg/L, Cu <0,031 mg/L, Pb <0,033 mg/L, dan Cr 0,091 mg/L. Penelitian ini menunjukkan bahwa mortar Berbasis ferri oksida dan *fly ash* aman secara lingkungan dan tetap layak secara teknis. Kombinasi kedua limbah ini berpotensi dikembangkan sebagai material konstruksi ramah lingkungan yang memenuhi kriteria teknis dan lingkungan.

Kata kunci: Ferri oksida, *Fly Ash*, Mortar Semen, Uji TCLP, Kelayakan Lingkungan

1. PENDAHULUAN

Meningkatnya aktivitas industri baja dan pembangkit listrik berbahan bakar batubara telah menghasilkan limbah padat seperti ferri oksida dan *fly ash* dalam jumlah besar. Limbah ini jika tidak dikelola dengan baik, dapat berpotensi mencemari lingkungan. Oleh karena itu, perlu dilakukan pemanfaatan sebagai bahan tambahan dalam konstruksi yang menjadi salah satu strategi mendukung pembangunan berkelanjutan sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap material konvensional.

Ferri oksida merupakan limbah dari proses oksidasi penggulangan baja yang berukuran mikro yang mengandung 99,38% Fe₂O₃ (hematit) sebagai komponen utama. Kandungan oksida besi yang tinggi ini memberikan potensi besar untuk digunakan sebagai bahan pengisi (filler) dalam campuran mortar, mengingat sifatnya yang dapat meningkatkan kepadatan dan kekuatan mekanik, sehingga berpotensi sebagai filler dalam mortar semen (Khanna dkk., 2023). Sedangkan *fly ash* merupakan limbah dari pembakaran batu bara yang mengandung silica, alumina dan memiliki sifat pozzolan sehingga dapat digunakan sebagai substitusi semen untuk meningkatkan kekuatan (Alterary & Marei, 2021).

Berbagai studi menunjukkan bahwa pemanfaatan ferri oksida dan *fly ash* dalam mortar dapat meningkatkan sifat mekanik seperti kuat tekan dan densitas (Abdalla & Salih Mohammed, 2022; Borucka-Lipska dkk., 2021). Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang lebih menekankan pada peningkatan sifat mekanik mortar melalui pemanfaatan ferri oksida dan *fly ash*. Penelitian ini tidak hanya mengkaji sifat mekanik mortar, tetapi juga memperhatikan potensi pelindian logam berat yang dapat mencemari lingkungan, khususnya pada kondisi asam. Penelitian ini menggunakan uji *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP) untuk mengevaluasi potensi pencemaran dari mortar yang mengandung kombinasi ferri oksida dan *fly ash* dalam variasi ferri oksida 0%, 30%, dengan *fly ash* tetap 30%. Hasil penelitian diharapkan mendukung pengembangan material konstruksi yang ramah lingkungan dan sesuai dengan regulasi PP No. 22 Tahun 2021.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan melalui serangkaian tahapan eksperimental untuk menganalisis potensi pencemaran lingkungan mortar semen berbasis ferri oksida dan *fly ash*.

2.1 Bahan Penelitian

Bahan penelitian meliputi semen pcc, pasir Lumajang yang berasal dari lahar gunung Semeru, *fly ash* yang berasal dari PLTU Tanjung Awar-Awar Tuban sebagai bahan pozzolan, ferri oksida berasal dari perusahaan manufaktur baja di Jawa Timur, *Superplastizer berbasis polycarboxylate ether* (PCE) dengan tipe HRWR dari sika 3115N dan air digunakan sesuai kebutuhan untuk mencapai workability yang seragam.

2.2 Karakterisasi Material

A. Uji berat Jenis

Uji berat jenis dilakukan terhadap pasir Lumajang, ferri oksida dan *fly ash* menggunakan metode piknometer sesuai SNI 1969:2008. Nilai berat jenis digunakan dalam perhitungan perbandingan campuran dan analisis massa jenis mortar. Rumus perhitungan berat jenis sebagai berikut.

$$\text{Berat Jenis (BJ)} = \frac{A}{B-C} \dots\dots\dots (1)$$

A = Massa pasir kering dalam udara (g)

B = Massa piknometer + air + pasir (g)

C = Massa piknometer + air

B. Uji Kadar Air

Kadar air agregat halus diuji berdasarkan SNI 1971:2011. Nilai ini berguna untuk menentukan kadar air efektif dalam campuran mortar agar tidak mengganggu proporsi binder. Rumus perhitungan daya serap air berikut.

$$\text{Kadar Air} = \frac{A-B}{A} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

A = Berat pasir (g)

B = Berat pasir kering (g)

C. Uji Gradasi

Gradasi agregat halus diuji menggunakan ayakan standar berdasarkan SNI 03-1968. Hasil uji digunakan untuk memastikan agregat memenuhi kriteria zona gradasi yang sesuai untuk pembuatan mortar.

D. Uji X-Ray Fluorescence (XRF)

Analisis XRF dilakukan di **Laboratorium Litbang Semen Indonesia** menggunakan **PANalytical Axios** untuk mengetahui komposisi kimia oksida utama dalam bentuk persentase berat (%wt).

E. Uji X-Ray Diffraction (XRD)

Pengujian XRD dilakukan di Laboratorium Litbang Semen Indonesia menggunakan difraktometer PANalytical X'Pert PRO untuk identifikasi fasa mineral berdasarkan database ICDD.

2.3 Pembuatan Sampel Mortar Semen

Seluruh bahan kering dicampur hingga homogen, kemudian ditambahkan air dengan perbandingan tetap untuk menghasilkan konsistensi adukan yang seragam. Campuran mortar dicetak ke dalam cetakan silinder ukuran diameter 7,5 cm tinggi 15 cm. Setelah 24 jam, benda uji dilepas dari cetakan lalu karung goni yang sudah dibasahi akan ditempatkan di atas permukaan mortar dan dijaga agar tetap lembab untuk proses perawatan (curing) hingga 28 hari sebelum dilakukan pengujian. *Mix design* pembuatan benda uji dapat dilihat pada Tabel 2. 2.

Tabel 2. 2 Mix Design Mortar Semen

Benda Uji	Semen Titius					FAS W/S	SP PCE	Agregat Halus	
	Semen	CaCO ₃ 3000	CaCO ₃ 5000	Fly Ash	Ferri Oksida			Pasir Lumajang 1	Pasir Lumajang 2
RM 1	0,63	0,035	0,035	0,3	0	0,27	0,015	0,6	0,4
RM 2	0,63	0,035	0,035	0,3	0,3	0,27	0,015	0,42	0,28

2.4 Uji Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 28 hari menggunakan mesin uji tekan hidrolik sesuai metode SNI 03-6825-2002, kuat tekan dihitung menggunakan rumus:

$$\text{Kuat Tekan} = \frac{P}{A} \text{ (MPa)} \dots\dots\dots (3)$$

P = Beban maksimum (N)

A = Luas penampang benda uji (cm²)

2.5 Pengujian Kelayakan Lingkungan

Pengujian TCLP dilaksanakan di laboratorium eksternal (PT Sucofindo) menggunakan metode EPA 1311. Sampel dianalisis menggunakan AAS (Atomic Absorption Spectroscopy) untuk menentukan kadar logam berat seng (Zn), Nikel(Ni), Barium(Ba), Tembaga(Cu), Kromium(Cr) dan Timbal(Pb). Hasil uji TCLP dibandingkan dengan baku mutu yang ditetapkan dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Baku Mutu Limbah B3.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Karakterisasi Material

A. Berat Jenis dan Kadar Air Material

Pengujian berat jenis dan kadar air dilakukan untuk mengetahui sifat dasar material yang digunakan dalam campuran mortar. Nilai ini berperan penting dalam menentukan proporsi campuran serta penyesuaian kebutuhan air efektif. Hasil Uji berat jenis dan kadar air material dapat dilihat pada Tabel 3. 2

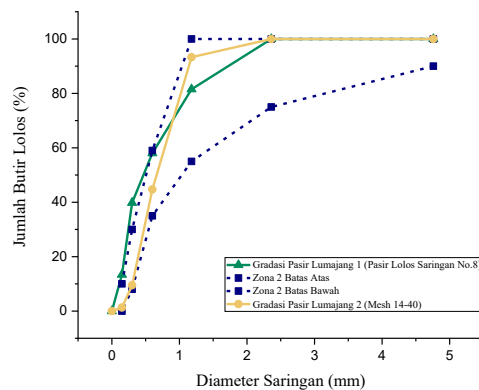
Tabel 3. 2 Hasil Uji Berat Jenis Dan Kadar Air Material

Material	Berat Jenis (g/cm ³)	Kadar Air (%)
Ferri oksida	2,48	0,13
Pasir Lumajang 1 (Lolos Saringan No 8)	2,45	4,38
Pasir Lumajang 2 (Mesh 14-40)	2,68	0,17

Berdasarkan Tabel 3. 2 ferri oksida memiliki berat jenis sebesar **2,48 g/cm³** dan kadar air **0,13%**, menunjukkan material yang padat dan kering. Dua jenis pasir dari Lumajang digunakan sebagai agregat halus, yaitu Pasir Lumajang 1 dengan berat jenis **2,45 g/cm³** dan kadar air **4,38%**, serta Pasir Lumajang 2 dengan berat jenis **2,68 g/cm³** dan kadar air **0,17%**. Berdasarkan SNI 1969:2008, berat jenis agregat halus ideal berada pada kisaran **2,4–2,9 g/cm³** sehingga semua material yang diuji sesuai. Nilai kadar air memiliki nilai dalam batas toleransi menurut SNI 1971:2011 yaitu 0–5% sehingga semua material sesuai.

B. Gradasi Pasir

Pengujian gradasi dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran partikel agregat halus yang digunakan dalam campuran mortar. Distribusi ini memengaruhi workability, kepadatan, dan kekuatan mortar. Hasil uji gradasi dua jenis pasir yang digunakan disajikan pada Gambar 3. 3.

**Gambar 3. 3** Grafik Gradasi Agregat Halus

Berdasarkan grafik pada Gambar 3. 3 distribusi butiran pasir Lumajang 1 berada di dalam **zona 2**, namun mendekati batas bawah, menunjukkan tekstur yang lebih halus. Sebaliknya, pasir Lumajang 2 menunjukkan distribusi butiran yang lebih kasar dengan garis mendekati batas atas zona 2. Gradasi yang sesuai zona 2 direkomendasikan dalam SNI 03-6825-2002 memberikan keseimbangan antara *workability* dan kekuatan mekanik. Kombinasi kedua jenis pasir ini dapat meningkatkan kepadatan dan performa mortar secara keseluruhan.

Nilai *Fine Modulus* (FM) yang diperoleh dari Pasir Lumajang 2 adalah 2,512 lebih tinggi dibandingkan Pasir Lumajang 1 yang memiliki FM sebesar 2,512. FM yang lebih tinggi menunjukkan partikel yang lebih besar dan kasar. Pasir Lumajang 2 masih berada dalam rentang FM standar untuk agregat halus (1,5–3,8), sehingga tetap layak digunakan sebagai bahan *filler* dalam mortar.

C. Uji X-Ray Fluorescence (XRF)

Pengujian XRF limbah ferri oksida dan *fly ash* dilakukan di Laboratorium Litbang Semen Indonesia, berikut hasil pengujian disajikan pada Tabel 3. 3.

Tabel 3. 3 Hasil Uji X-Ray Fluorescence (XRF) FERRI OKSIDA dan *Fly Ash*

Unsur Oksida (%)	Ferri oksida	<i>Fly Ash</i>
Fe ₂ O ₃	99,38	18,46
SiO ₂	0,03	47,51
Al ₂ O ₃	0,04	19,27
CaO	0,01	8,89
Lainnya	5,5	16,1

Berdasarkan Tabel 3. 3 hasil uji XRF menunjukkan bahwa ferri oksida didominasi oleh unsur besi (Fe₂O₃) sebesar 99,38%, sehingga memiliki karakteristik *inert* (non-reaktif secara kimia terhadap air) dan tidak ikut bereaksi oleh proses hidrasi semen (Worku dkk., 2023). *fly ash* memiliki kandungan SiO₂ sebesar 47,51%, Al₂O₃ 19,27%, dan Fe₂O₃ 18,46%, sehingga total kandungan oksida utama mencapai 85,24%, melebihi batas minimum 70% sesuai ASTM C618-22 untuk klasifikasi *fly ash* kelas F. Kandungan CaO sebesar 8,89% juga menguatkan klasifikasi ini. Komposisi tersebut mendukung sifat pozzolanik *fly ash* yang dapat bereaksi dengan Ca(OH)₂ membentuk senyawa C-S-H.

D. Uji X-Ray Diffraction (XRD)

Pengujian XRD dilakukan di Laboratorium Litbang Semen Indonesia, berikut hasil pengujian disajikan pada Tabel 3. 4

Tabel 3. 4 Hasil Uji *X-Ray Diffraction* (XRD) FERRI OKSIDA dan *Fly Ash*

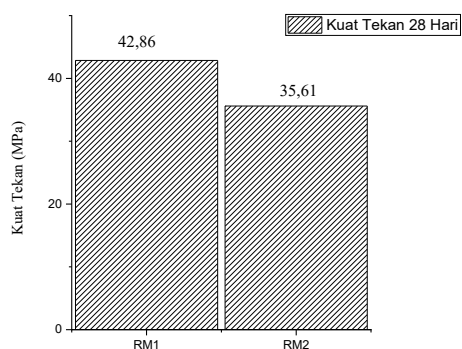
Material	Fasa Kristalin	Nilai (%)
Ferri oksida	Magnetite	0,05
	Maghemite	0,01
	Hematite	99,94
<i>Fly Ash</i>	Mullite	9,46
	Kuarsa	26,96
	Hkl Phase	30,38
	Magnetit	14,41

Berdasarkan Tabel 3. 4 fasa kristalin utama pada ferri oksida hematit (99,94%), dengan sedikit magnetit (0,05%) dan maghemit (0,01%), menandakan sifatnya yang *inert* dan berfungsi sebagai *filler* dalam mortar. *Filler inert* ini berperan dalam meningkatkan kepadatan mikrostruktur mortar dengan memperkuat ikatan antar produk hidrasi tanpa menyebabkan reaksi kimia baru.

Fly ash mengandung fasa kristalin seperti kuarsa, mullite, magnetit serta fase amorf sebesar (HKL Phase) yang berperan penting dalam reaksi pozzolan. Fase amorf ini bereaksi dengan Ca(OH)_2 hasil hidrasi semen untuk membentuk C-S-H yang memperkuat mortar. Kombinasi antara fase kristalin dan amorf menunjukkan bahwa *fly ash* memiliki potensi tinggi sebagai bahan substitusi semen karena mendukung kekuatan jangka panjang serta stabilitas struktur mikro mortar (Scrivener dkk., 2018).

3.2 Analisis Uji Kuat Tekan Mortar

Mortar yang telah melalui proses curing selama 28 hari dilakukan pengujian kuat tekan, berikut hasil pengujian disajikan pada



Gambar 3. 4 Grafik Hasil Uji Kuat Tekan.

Kuat tekan menunjukkan bahwa mortar variasi RM1 (kontrol) memiliki nilai sebesar 42,86 MPa, sedangkan variasi RM2 dengan penambahan 30% ferri oksida menunjukkan penurunan menjadi 35,61 MPa. Penurunan ini menunjukkan bahwa penambahan ferri oksida dalam jumlah tinggi dapat mengurangi pembentukan produk hidrasi semen, sehingga kerapatan ikatan antar partikel berkurang. Kondisi tersebut, ferri oksida lebih berperan sebagai pengisi (*filler*) yang menutup rongga, tetapi tidak memberikan kontribusi reaktif terhadap penguatan mortar. Meskipun terjadi penurunan, nilai kuat tekan RM2 tetap melampaui batas minimum yang disyaratkan dalam ASTM C270-19a untuk mortar beban berat, pondasi dan kontak tanah yaitu $\geq 17,2$ MPa pada umur 28 hari. Dengan demikian, penggunaan ferri oksida sebesar 30% masih dinilai layak dari segi teknis.

3.3 Analisis Uji TCLP

Uji *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP) dilakukan untuk mengetahui potensi pelindian logam berat dari mortar semen yang mengandung ferri oksida dan *fly Ash*. Pengujian ini hanya difokuskan pada variasi RM2, karena mengandung ferri oksida dan *fly ash*. Hasil uji TCLP dapat dilihat Tabel 3. 5.

Tabel 3. 5 Hasil Uji TCLP Mortar Semen

Parameter Logam Berat	Konsentrasi Hasil Uji (mg/L)	Baku Mutu (mg/L)	Keterangan
seng (Zn)	<0,747	50	Memenuhi
Nikel(Ni)	<0,034	3,5	Memenuhi
Barium(Ba)	<1,416	35	Memenuhi
Tembaga(Cu)	<0,031	10	Memenuhi

Parameter Logam Berat	Konsentrasi Hasil Uji (mg/L)	Baku Mutu (mg/L)	Keterangan
Kromium(Cr)	0,091	2,5	Memenuhi
Timbal(Pb)	<0,033	0,5	Memenuhi

Berdasarkan Tabel Tabel 3. 5 menunjukkan bahwa kandungan logam berat utama yang terlarut dalam larutan pelindi berada di bawah batas maksimum yang ditetapkan dalam PP No. 22 Tahun 2021. Hasil TCLP menunjukkan bahwa mortar dengan 30% ferri oksida tidak berpotensi mencemari lingkungan, karena seluruh unsur logam berat yang diuji berada jauh di bawah batas ambang. Sehingga penggunaan limbah ferri oksida sebagai *filler* dan *fly ash* sebagai substitusi semen tidak hanya meningkatkan sifat mekanik, tetapi juga tidak berdampak negatif terhadap lingkungan.

Sifat fisik mortar yang baik mengindikasikan struktur mortar yang padat dan minim pori terbuka. Sehingga turut membatasi pergerakan dan pelindian ion logam dari dalam matriks mortar ke lingkungan sekitar (Hu dkk., 2019). Dengan demikian, penggunaan ferri oksida sebagai bahan tambah dalam mortar semen dapat dikategorikan aman secara lingkungan dan berpotensi sebagai solusi pemanfaatan limbah industri baja, khususnya jika dikombinasikan dengan bahan tambah seperti *fly ash*.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menganalisis potensi pencemaran mortar semen yang mengandung limbah ferri oksida dan *fly Ash* melalui uji TCLP. Hasil menunjukkan bahwa variasi dengan 30% ferri oksida dan 30% *fly ash* memiliki kadar logam berat (Zn, Ni, Ba, Cu, Cr, dan Pb) yang berada jauh di bawah ambang batas baku mutu limbah B3 sesuai PP No. 22 Tahun 2021. Mortar berbasis limbah ferri oksida dan *fly Ash* dinyatakan aman dan layak secara lingkungan. Penggunaan ferri oksida dan *fly Ash* terbukti tidak menimbulkan potensi pencemaran berbahaya, serta berkontribusi pada pemanfaatan limbah inrdustri dalam material konstruksi berkelanjutan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Abdalla, A., & Salih Mohammed, A. (2022). Surrogate Models to Predict the Long-Term Compressive Strength of Cement-Based Mortar Modified with Fly Ash. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(6), 4187–4212. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09734-7>
- Alterary, S. S., & Marei, N. H. (2021). Fly ash properties, characterization, and applications: A review. *Journal of King Saud University - Science*, 33(6), 101536. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101536>
- ASTM C270-19a. (1995). Standard Specification for Extended Life Mortar for Unit Masonry 1. *ASTM Standards*, i(ASTM International), 2–5.
- ASTM C618-22. (2022). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. *ASTM Standards*, i(West Conshohocken, PA: ASTM International).
- Borucka-Lipska, J., Brzozowski, P., Błyszko, J., Bednarek, R., & Horszczaruk, E. (2021). Effects of elevated temperatures on the properties of cement mortars with the iron oxides concentrate. *Materials*, 14(1), 1–17. <https://doi.org/10.3390/ma14010148>
- Hu, X., Shi, C., Shi, Z., & Zhang, L. (2019). Compressive strength, pore structure and chloride transport properties of alkali-activated slag/fly ash mortars. *Cement and Concrete Composites*, 104. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103392>
- Indonesia, P. R. (2021). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2021 Nomor 32. 085459, 2.*
- Khanna, R., Konyukhov, Y., Li, K., Jayasankar, K., Maslennikov, N., Zinoveev, D., Kargin, J., Burmistrov, I., Leybo, D., Kravchenko, M., & Mukherjee, P. S. (2023). Innovative Transformation and Valorisation of Red Mill Scale Waste into Ferroalloys: Carbothermic Reduction in the Presence of Alumina. *Sustainability (Switzerland)*, 15(24). <https://doi.org/10.3390/su152416810>
- Nasional, B. S. (2008). SNI 1969:2008 Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar. *Badan Standar Nasional Indonesia*, 20.
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114(February), 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- SNI 03-1968. (1990). Metode Pengujian Tentang Analisis Saringan Agregat Halus dan Kasar. *Sni 03-1968-1990*, 1–5.
- SNI 03-6825-2002. (2002). Sni 03-6825-2002. *Standar Nasional Indonesia Metode Pengujian Kekuatan Tekan Mortar Semen Portland Untuk Pekerjaan Sipil*, 6825.
- SNI 1971:2011. (2011). “Cara uji kadar air total agregat dengan pengeringan.” *Badan Standarisasi Nasional*, 1–11.
- Worku, M. A., Taffese, W. Z., Hailemariam, B. Z., & Yehualaw, M. D. (2023). Cow Dung Ash in Mortar: An Experimental Study. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(10), 1–15. <https://doi.org/10.3390/app13106218>