ANALISIS POTENSI POZZOLANIK DEBU PREPARASI ORE UNTUK SUBSTITUSI SEMEN BERDASARKAN KOMPOSISI OKSIDA

Wahyu Novriyanto Ramba[1], A Sry Iryani[2]

[1,2]*Universitas Fajar Makassar*
E-mail : andisryani@unifa.ac.id

ABSTRAK

Industri pertambangan menghasilkan limbah padat berupa debu preparasi ore yang umumnya belum dimanfaatkan secara optimal dan berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik kimia limbah debu preparasi ore serta mengevaluasi potensinya sebagai bahan substitusi parsial semen berdasarkan komposisi oksida menggunakan metode X-Ray Fluorescence (XRF). Penelitian menggunakan pendekatan eksperimental deskriptif terhadap tiga jenis sampel limbah berdasarkan variasi grade ore, yaitu low grade, medium grade, dan high grade. Sampel dipreparasi menggunakan metode fused bead sebelum dianalisis dengan instrumen XRF. Hasil penelitian menunjukkan bahwa limbah debu preparasi ore mengandung oksida utama berupa SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, MgO, dan CaO. Kandungan SiO_2 mengalami penurunan dari 41,25% menjadi 35,15%, sedangkan Fe_2O_3 meningkat dari 18,45% menjadi 25,87% seiring meningkatnya grade ore. Total oksida pozzolan (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3) berada pada kisaran 63,64–65,10%, menunjukkan adanya potensi sebagai material substitusi parsial semen meskipun belum memenuhi persyaratan minimum material pozzolan menurut ASTM C618. Kandungan CaO yang sangat rendah menunjukkan bahwa limbah ini tidak dapat menggantikan fungsi semen secara penuh, tetapi berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan substitusi parsial setelah dilakukan pengujian sifat fisik dan mekanik pada penelitian lanjutan. Pemanfaatan limbah debu preparasi ore diharapkan mampu mendukung konsep konstruksi berkelanjutan melalui pengurangan limbah industri dan penggunaan material alternatif yang lebih ramah lingkungan.

Kata Kunci : *Limbah Debu Preparasi Ore, Semen Portland, Substitusi Parsial Semen, X-Ray Fluorescence, Material Pozzolan.*

ABSTRACT

The mining industry generates solid waste in the form of ore preparation dust, which is generally underutilized and has the potential to cause environmental pollution. This study aimed to analyze the chemical characteristics of ore preparation dust waste and evaluate its potential as a partial cement replacement material based on oxide composition using the X-Ray Fluorescence (XRF) method. A descriptive experimental approach was employed using three waste samples representing different ore grades, namely low-grade, medium-grade, and high-grade ore. The samples were prepared using the fused bead method prior to XRF analysis. The results revealed that the ore preparation dust contained major oxides, including SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, MgO, and CaO. The SiO_2 content decreased from 41.25% to 35.15%, while Fe_2O_3 increased from 18.45% to 25.87% as the ore grade increased. The total pozzolanic oxide content (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3) ranged from 63.64% to 65.10%, indicating its potential as a partial cement replacement material, although it did not meet the minimum pozzolanic material requirement specified in ASTM C618. The relatively low CaO content suggests that the waste is unsuitable as a complete cement replacement but has considerable potential for partial substitution following further evaluation of its physical and mechanical properties. The utilization of ore preparation dust waste is expected to support sustainable construction practices by reducing mining waste and promoting the use of environmentally friendly alternative materials.

Keywords : *Ore Preparation Dust, Portland Cement, Partial Cement Replacement, X-Ray Fluorescence (XRF), Pozzolanic Material.*

PENDAHULUAN

Industri konstruksi merupakan salah satu sektor yang sangat bergantung pada penggunaan semen sebagai bahan pengikat utama dalam pembuatan beton dan mortar. Beton merupakan material konstruksi yang paling banyak digunakan di dunia karena memiliki kekuatan yang baik, daya tahan tinggi, serta biaya produksi yang relatif rendah dibandingkan dengan material konstruksi lainnya. Namun demikian, produksi semen memiliki dampak lingkungan yang cukup besar karena proses pembuatannya membutuhkan energi tinggi serta menghasilkan emisi karbon dioksida (CO_2) dalam jumlah signifikan. Produksi beton dan semen secara global memerlukan sumber daya alam dalam jumlah besar dan berkontribusi terhadap konsumsi energi yang tinggi serta emisi gas rumah kaca. Oleh karena itu, berbagai penelitian terus dilakukan untuk mengembangkan material alternatif yang dapat menggantikan sebagian penggunaan semen dalam campuran beton guna mendukung pembangunan yang lebih berkelanjutan (Dobiszewska dkk., 2023).

Produksi beton tidak hanya membutuhkan sumber daya alam dalam jumlah besar tetapi juga menghasilkan dampak lingkungan yang cukup signifikan. Oleh karena itu, berbagai penelitian telah difokuskan pada pemanfaatan material limbah industri sebagai bahan pengganti sebagian semen dalam komposit semen. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan limbah mineral seperti *rock dust* atau debu batuan dapat dimanfaatkan sebagai bahan substitusi parsial semen dalam campuran beton. Hal ini dilakukan untuk mengurangi penggunaan semen sekaligus meningkatkan efisiensi pemanfaatan limbah industri (Dobiszewska dkk., 2023).

Selain itu, penggunaan material limbah industri dalam konstruksi juga memiliki manfaat dari segi lingkungan dan ekonomi. Pemanfaatan limbah industri dapat mengurangi kebutuhan bahan baku alam, mengurangi biaya produksi, serta mengurangi jumlah limbah yang harus dibuang ke lingkungan. Penggunaan material daur ulang atau limbah industri dalam konstruksi dapat memberikan manfaat berupa penghematan sumber daya alam, pengurangan konsumsi energi, serta penurunan emisi gas rumah kaca. Dengan demikian, pemanfaatan limbah industri sebagai bahan tambahan atau substitusi dalam material konstruksi merupakan salah satu pendekatan yang efektif untuk mendukung konsep pembangunan berkelanjutan (Zhao dkk., 2022).

Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan adalah pemanfaatan limbah industri sebagai bahan substitusi parsial semen. Berbagai jenis limbah seperti *fly ash*, *slag*, *ceramic waste*, *marble dust*, maupun *granite dust* telah diteliti dan terbukti dapat dimanfaatkan sebagai bahan tambahan atau pengganti sebagian semen dalam campuran beton maupun mortar. Penggunaan limbah tersebut tidak hanya mampu mengurangi konsumsi semen, tetapi juga membantu mengurangi pencemaran lingkungan akibat akumulasi limbah industri (Irshidat & Al-Nuaimi, 2020).

Dalam industri pertambangan, kegiatan pengolahan bijih (*ore processing*) menghasilkan berbagai jenis limbah padat dalam jumlah besar. Limbah tersebut dihasilkan dari berbagai tahapan proses seperti penghancuran (crushing), penggilingan (*grinding*), serta pengayakan (*screening*) yang bertujuan untuk memisahkan mineral berharga dari batuan pengotornya. Salah satu jenis limbah yang dihasilkan dari proses tersebut adalah debu preparasi *ore* atau *ore preparation dust*. Limbah ini umumnya berbentuk serbuk halus yang berasal dari proses penghancuran dan pengolahan mineral. Jumlah limbah debu ini dapat mencapai volume yang cukup besar dan sering kali hanya ditimbun tanpa pemanfaatan lebih lanjut sehingga berpotensi menimbulkan

permasalahan lingkungan seperti pencemaran udara maupun pencemaran tanah (Amjad dkk., 2025).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa material berbasis debu batuan atau limbah mineral memiliki potensi untuk digunakan sebagai bahan pengganti sebagian semen karena mengandung senyawa oksida seperti SiO_2, Al_2O_3, dan CaO yang berperan dalam proses hidrasi semen. Penggunaan serbuk batuan atau rock dust sebagai substitusi parsial semen bahkan dapat meningkatkan sifat mekanik maupun durabilitas beton pada tingkat penggantian tertentu (Dobiszewska dkk., 2023).

Penelitian sebelumnya lebih banyak membahas pemanfaatan *rock dust* secara umum dengan fokus pada pengujian sifat mekanik beton. Sedangkan penelitian ini berfokus pada limbah debu hasil preparasi *ore* yang memiliki karakteristik berbeda serta belum banyak dikaji. Selain itu, penelitian ini menitikberatkan pada analisis komposisi kimia menggunakan *X-Ray Fluorescence (XRF)* sebagai tahap awal untuk mengevaluasi potensi material sebagai substitusi parsial semen.

Untuk mengetahui kelayakan limbah debu preparasi *ore* sebagai bahan substitusi semen, diperlukan analisis karakteristik kimia material tersebut. Salah satu metode yang umum digunakan untuk menganalisis komposisi unsur dalam material padatan adalah *X-Ray Fluorescence (XRF)*. Metode ini mampu memberikan analisis kuantitatif yang cepat, presisi, dan akurat terhadap unsur-unsur utama seperti CaO, SiO, Al_2O dan Fe_2O_3 yang sangat penting dalam material penyusun semen (Irshidat & Al-Nuaimi, 2020).

Berdasarkan uraian tersebut, limbah debu preparasi *ore* memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan substitusi parsial semen karena berasal dari material mineral yang kemungkinan mengandung unsur oksida yang serupa dengan komponen penyusun semen. Namun demikian, sebelum limbah tersebut dapat digunakan sebagai bahan substitusi semen, perlu dilakukan analisis komposisi kimia untuk mengetahui kandungan unsur yang terdapat di dalamnya. Oleh karena itu, penelitian mengenai pemanfaatan limbah debu preparasi *ore* sebagai substitusi parsial semen berdasarkan analisis XRF perlu dilakukan untuk mengevaluasi potensi material tersebut sebagai bahan alternatif yang lebih ramah lingkungan serta mendukung pemanfaatan limbah industri secara lebih optimal.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental deskriptif yang bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik kimia limbah debu preparasi *ore* serta mengevaluasi potensinya sebagai bahan substitusi parsial semen berdasarkan komposisi oksida yang diperoleh melalui analisis X-Ray Fluorescence (XRF). Penelitian dilaksanakan di laboratorium dengan tahapan yang meliputi pengambilan sampel, preparasi sampel, analisis komposisi kimia, serta interpretasi hasil berdasarkan standar dan literatur yang relevan.

Bahan penelitian berupa limbah debu preparasi *ore* yang berasal dari proses preparasi bijih nikel dengan tiga variasi grade, yaitu low grade, medium grade, dan high grade. Ketiga sampel dipilih untuk mengetahui pengaruh variasi grade terhadap kandungan oksida penyusun limbah. Peralatan utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi alat preparasi sampel, timbangan analitik, *fusion furnace*, cetakan *fused bead*, dan instrumen X-Ray Fluorescence (XRF) sebagai alat utama untuk menganalisis komposisi unsur penyusun sampel.

Preparasi sampel dilakukan menggunakan metode fused bead, yaitu dengan mencampurkan sampel limbah yang telah dikeringkan dan dihaluskan dengan bahan fluks sesuai

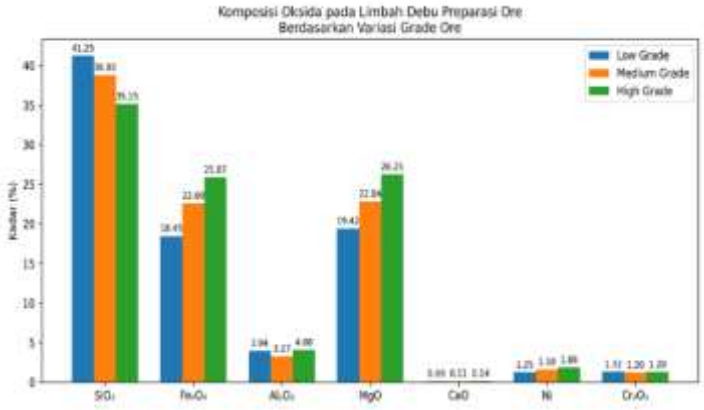
prosedur analisis XRF. Campuran kemudian dipanaskan menggunakan *fusion furnace* hingga membentuk lelehan homogen dan dicetak menjadi *glass bead*. Metode ini dipilih karena mampu menghasilkan sampel yang homogen sehingga meningkatkan akurasi analisis komposisi kimia menggunakan XRF.

Hasil analisis disajikan dalam bentuk tabel dan uraian deskriptif untuk menggambarkan hubungan antara variasi grade *ore* dengan perubahan komposisi kimia limbah debu preparasi *ore*. Selanjutnya, dilakukan evaluasi terhadap potensi pemanfaatan limbah sebagai bahan substitusi parsial semen berdasarkan kandungan oksida pozzolan dan karakteristik kimia yang diperoleh dari hasil pengujian XRF.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisis Xrf Limbah Debu Preparasi Ore

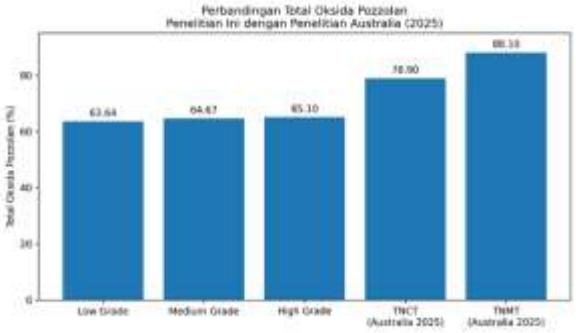
Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi limbah debu preparasi ore sebagai bahan substitusi parsial semen melalui analisis komposisi kimia menggunakan metode **X-Ray Fluorescence (XRF)**. Analisis XRF dipilih karena mampu mengidentifikasi komposisi unsur maupun oksida utama yang terkandung dalam suatu material secara cepat, akurat, dan tidak merusak sampel. Pada penelitian ini digunakan tiga jenis sampel limbah debu preparasi ore yang berasal dari perbedaan kadar bijih (ore grade), yaitu ***low grade***, ***medium grade***, dan ***high grade***. Perbedaan *grade ore* diperkirakan akan memengaruhi komposisi kimia limbah yang dihasilkan karena setiap jenis bijih memiliki karakteristik mineralogi yang berbeda. Oleh karena itu, analisis dilakukan terhadap masing-masing sampel untuk mengetahui perubahan komposisi oksida yang terjadi akibat variasi kadar ore.Secara umum, hasil analisis menunjukkan bahwa limbah debu preparasi ore mengandung beberapa oksida utama, yaitu **SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, MgO, CaO**, serta unsur lain seperti **Ni** dan **Cr_2O_3**. Keberadaan oksida-oksida tersebut menunjukkan bahwa limbah debu preparasi ore memiliki karakteristik kimia yang berasal dari mineral penyusun bijih nikel laterit. Komposisi tersebut menjadi dasar dalam mengevaluasi potensi limbah sebagai bahan substitusi parsial semen karena beberapa oksida, terutama **SiO_2, Al_2O_3, dan Fe_2O_3**, merupakan komponen yang umum dijumpai pada material pozzolan maupun bahan penyusun semen.



Gambar 1. Komposisi Oksida pada Limbah Debu Preparasi Ore Berdasarkan Variasi Grade Ore

Berdasarkan hasil analisis, kandungan **SiO_2** merupakan komponen terbesar pada seluruh sampel dengan kisaran **35,15–41,25%**. Kandungan silika yang relatif tinggi menunjukkan bahwa

limbah debu preparasi ore masih didominasi oleh mineral silikat yang berasal dari proses preparasi bijih nikel. Selain itu, kandungan **Fe_2O_3** juga cukup tinggi, yaitu berada pada rentang **18,45–25,87%**, sedangkan **MgO** berada pada kisaran **19,42–26,25%**. Kandungan **Al_2O_3** dan **CaO** relatif lebih rendah dibandingkan oksida lainnya, namun tetap menjadi parameter penting dalam mengevaluasi karakteristik kimia limbah tersebut. Secara umum, keberadaan oksida-oksida tersebut menunjukkan bahwa limbah debu preparasi ore memiliki karakteristik mineral yang kompleks. Komposisi kimia yang diperoleh selanjutnya dianalisis untuk mengetahui pengaruh variasi grade ore terhadap perubahan kandungan masing-masing oksida serta mengevaluasi kesesuaiannya sebagai bahan substitusi parsial semen. Pembahasan mengenai kecenderungan perubahan setiap oksida disajikan pada subbab berikutnya berdasarkan grafik hasil analisis XRF.



Gambar 2. Perbandingan Total Oksida Pozzolan Penelitian Ini dengan Penelitian Australia (2025)

Berdasarkan Gambar 2 total kandungan oksida pozzolan (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3) pada limbah debu preparasi ore berturut-turut sebesar 63,64% pada sampel low grade, 64,67% pada sampel medium grade, dan 65,10% pada sampel high grade. Hasil tersebut menunjukkan adanya kecenderungan peningkatan total oksida pozzolan seiring meningkatnya grade ore, meskipun peningkatannya relatif kecil. Apabila dibandingkan dengan penelitian Recycling of Mine Tailings as Supplementary Cementitious Material (2025), total oksida pozzolan pada penelitian ini masih lebih rendah dibandingkan material tailing yang dilaporkan, yaitu sebesar 78,90% pada sampel TNCT dan 88,10% pada sampel TNMT. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa karakteristik kimia limbah tambang sangat dipengaruhi oleh jenis mineral penyusun, kondisi geologi endapan, serta proses pengolahan mineral sebelum limbah dihasilkan. Meskipun demikian, kandungan oksida pozzolan pada limbah debu preparasi ore masih didominasi oleh SiO_2, Al_2O_3, dan Fe_2O_3, yang merupakan komponen utama penyusun material pozzolan. Menurut Simonsen et al. (2020), potensi limbah tambang sebagai supplementary cementitious material (SCM) tidak hanya ditentukan oleh besarnya total oksida pozzolan, tetapi juga dipengaruhi oleh komposisi mineralogi, tingkat kristalinitas, ukuran partikel, dan reaktivitas material. Oleh karena itu, limbah dengan total oksida yang belum mencapai nilai tinggi masih dapat dimanfaatkan sebagai SCM apabila dilakukan proses aktivasi, seperti penghalusan mekanis (mechanical activation) atau perlakuan termal.

Berdasarkan ASTM C618, material pozzolan alami maupun buatan umumnya disyaratkan memiliki jumlah kandungan SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 ≥ 70% untuk memenuhi persyaratan kimia sebagai material pozzolan. Pada penelitian ini, total oksida pozzolan berada pada kisaran 63,64–65,10%, sehingga belum mencapai batas minimum tersebut. Namun demikian, tingginya kandungan SiO_2 dan Fe_2O_3 menunjukkan bahwa limbah debu preparasi ore tetap memiliki potensi

awal sebagai bahan substitusi parsial semen, khususnya apabila didukung dengan proses aktivasi serta pengujian sifat fisik dan mekanik pada penelitian lanjutan. Hasil penelitian ini juga sejalan dengan penelitian Ramanathan et al. (2021) yang menyatakan bahwa limbah tambang dengan kandungan oksida utama yang memadai dapat mengalami peningkatan aktivitas pozzolanik melalui aktivasi mekanis, sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai supplementary cementitious material pada campuran semen.

Pengaruh Variasi Kadar Ore Terhadap Komposisi Oksida

Variasi grade ore merupakan salah satu faktor yang memengaruhi karakteristik kimia limbah debu preparasi ore. Perbedaan kandungan mineral pada bijih nikel menyebabkan komposisi oksida yang terbentuk pada limbah hasil preparasi juga mengalami perubahan. Untuk mengetahui pengaruh tersebut, dilakukan analisis terhadap kandungan oksida utama pada sampel low grade, medium grade, dan high grade menggunakan metode X-Ray Fluorescence (XRF). Hasil analisis kemudian disajikan dalam bentuk grafik agar perubahan setiap oksida dapat diamati secara lebih jelas.

Grafik 1 menunjukkan bahwa kandungan silikon dioksida (SiO_2) mengalami kecenderungan menurun seiring meningkatnya grade ore. Kandungan SiO_2 pada sampel low grade tercatat sebesar 41,25%, kemudian menurun menjadi 38,80% pada medium grade dan 35,15% pada high grade. Penurunan kandungan SiO_2 menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar bijih nikel yang diproses, semakin rendah kandungan mineral silikat yang terbawa ke dalam limbah debu preparasi ore. Kondisi ini berkaitan dengan karakteristik endapan nikel laterit yang mengalami perubahan komposisi mineral akibat proses pelapukan. Pada bijih dengan kadar lebih tinggi, mineral pembawa nikel dan besi cenderung lebih dominan dibandingkan mineral silikat, sehingga persentase SiO_2 relatif menurun.

Meskipun mengalami penurunan, kandungan SiO_2 pada ketiga sampel masih tergolong tinggi. Silika merupakan salah satu komponen utama yang berperan dalam pembentukan senyawa Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) selama proses hidrasi semen. Senyawa C-S-H merupakan fase utama yang memberikan kontribusi terhadap kekuatan mekanik material berbasis semen. Oleh karena itu, kandungan SiO_2 yang cukup tinggi pada limbah debu preparasi ore menunjukkan adanya potensi material tersebut untuk dimanfaatkan sebagai bahan substitusi parsial semen.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Firdaus dkk. (2024) yang melaporkan bahwa peningkatan kadar ore menyebabkan kandungan SiO_2 cenderung menurun akibat perubahan karakteristik mineral penyusun endapan nikel laterit. Dengan demikian, perubahan kandungan SiO_2 pada penelitian ini menunjukkan bahwa variasi grade ore memberikan pengaruh terhadap komposisi oksida limbah debu preparasi ore.

Berdasarkan Grafik 1 terlihat bahwa kandungan Fe_2O_3 mengalami peningkatan yang cukup signifikan seiring meningkatnya grade ore. Kandungan Fe_2O_3 pada sampel low grade sebesar 18,45%, kemudian meningkat menjadi 22,60% pada medium grade dan mencapai 25,87% pada high grade. Peningkatan kandungan Fe_2O_3 mengindikasikan bahwa limbah debu preparasi ore dari bijih berkadar tinggi mengandung mineral besi yang lebih dominan dibandingkan sampel berkadar rendah. Kondisi tersebut sesuai dengan karakteristik bijih nikel laterit, dimana mineral pembawa besi cenderung meningkat pada material dengan kadar tertentu sehingga menyebabkan kandungan oksida besi menjadi lebih tinggi.

Dalam industri semen, Fe_2O_3 berfungsi sebagai salah satu komponen penyusun klinker dan berperan dalam pembentukan fase Tetracalcium Aluminoferrite (C_4AF). Walaupun kandungan Fe_2O_3 pada limbah debu preparasi ore lebih tinggi dibandingkan semen Portland, keberadaan

oksida besi tetap memberikan kontribusi terhadap karakteristik kimia material apabila digunakan sebagai bahan substitusi parsial semen.

Hasil analisis menunjukkan bahwa kandungan Al_2O_3 pada ketiga sampel relatif stabil, yaitu berkisar antara 3,27% hingga 4,08%. Perubahan kandungan Al_2O_3 tidak menunjukkan perbedaan yang terlalu besar dibandingkan perubahan yang terjadi pada SiO_2 maupun Fe_2O_3.Aluminium oksida merupakan salah satu komponen penting dalam pembentukan senyawa Tricalcium Aluminate (C_3A) pada semen. Keberadaan Al_2O_3 berperan dalam mempercepat reaksi hidrasi pada tahap awal pengerasan semen. Meskipun kandungannya relatif rendah dibandingkan semen Portland, keberadaan Al_2O_3 tetap memberikan kontribusi terhadap karakteristik kimia limbah debu preparasi ore.

Perbedaan kandungan Al_2O_3 yang tidak terlalu signifikan menunjukkan bahwa variasi grade ore tidak memberikan pengaruh yang besar terhadap distribusi aluminium dalam limbah hasil preparasi. Hal ini mengindikasikan bahwa mineral pembawa aluminium relatif tersebar merata pada ketiga jenis sampel.

Grafik 1 menunjukkan bahwa kandungan MgO mengalami peningkatan secara bertahap dari 19,42% pada low grade menjadi 22,84% pada medium grade dan 26,25% pada high grade. Peningkatan kandungan MgO menunjukkan bahwa semakin tinggi grade ore, semakin besar kandungan mineral yang mengandung magnesium pada limbah debu preparasi ore. Magnesium umumnya berasal dari mineral silikat seperti serpentin dan olivin yang banyak dijumpai pada endapan nikel laterit.

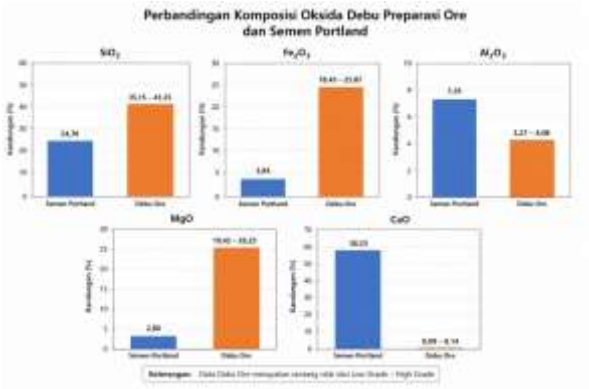
Dalam industri semen, MgO merupakan komponen minor yang keberadaannya perlu dikendalikan karena kandungan yang terlalu tinggi dapat memengaruhi stabilitas volume produk semen. Oleh karena itu, meskipun kandungan MgO pada limbah debu preparasi ore cukup tinggi, penggunaannya sebagai bahan substitusi harus mempertimbangkan proporsi pencampuran agar tidak memengaruhi kualitas produk akhir.

Kandungan CaO pada seluruh sampel tergolong sangat rendah, yaitu hanya berkisar antara 0,09% hingga 0,14%. Nilai tersebut jauh lebih kecil dibandingkan kandungan CaO pada semen Portland yang umumnya mencapai lebih dari 50%. Kalsium oksida merupakan komponen utama dalam pembentukan senyawa hidrat semen. Rendahnya kandungan CaO menunjukkan bahwa limbah debu preparasi ore tidak dapat berfungsi sebagai bahan pengikat utama seperti semen Portland. Namun demikian, material ini masih dapat dimanfaatkan sebagai bahan substitusi parsial, terutama karena memiliki kandungan SiO_2, Fe_2O_3, dan Al_2O_3 yang cukup tinggi.

Perbandingan Komposisi Oksida Limbah Debu Preparasi Ore Dengan Semen Portland

Perbandingan ini bertujuan untuk mengetahui kesesuaian kandungan oksida utama yang berperan dalam proses pembentukan senyawa hidrat semen sehingga dapat memberikan gambaran mengenai potensi limbah tersebut sebagai material substitusi.

Komposisi kimia semen Portland umumnya didominasi oleh kalsium oksida (CaO), silikon dioksida (SiO_2), aluminium oksida (Al_2O_3), dan besi oksida (Fe_2O_3). Keempat oksida tersebut merupakan penyusun utama mineral klinker yang berperan dalam proses hidrasi semen. Sementara itu, limbah debu preparasi ore memiliki komposisi oksida yang berbeda karena berasal dari material hasil preparasi bijih nikel lateriT.



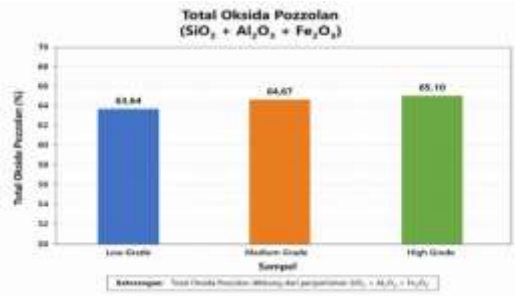
Gambar 3. Perbandingan Komposisi Oksida Debu Preparasi Ore dan Semen Portland

Berdasarkan Grafik 3 terlihat bahwa kandungan SiO_2 pada limbah debu prepares ore berada pada kisaran 35,15–41,25%, lebih tinggi dibandingkan kandungan SiO_2 pada semen Portland sebesar 24,70%. Tingginya kandungan silika menunjukkan bahwa limbah debu preparasi ore memiliki kandungan mineral silikat yang cukup besar sehingga berpotensi memberikan kontribusi terhadap pembentukan senyawa kalsium silikat hidrat (Calcium Silicate Hydrate atau C-S-H) apabila dicampurkan ke dalam sistem semen.

Kandungan Fe_2O_3 pada limbah debu preparasi ore juga menunjukkan nilai yang relatif tinggi, yaitu berkisar antara 18,45–25,87%, sedangkan pada semen Portland hanya sekitar 3,84%. Tingginya kandungan oksida besi mengindikasikan bahwa limbah debu preparasi ore masih didominasi oleh mineral pembawa besi yang berasal dari endapan nikel laterit. Dalam proses pembuatan semen, Fe_2O_3 berfungsi sebagai komponen pembentuk senyawa tetrakalsium aluminoferrit (C_4AF) yang berpengaruh terhadap warna dan proses pembakaran klinker.

Berbeda dengan SiO_2 dan Fe_2O_3, kandungan Al_2O_3 pada limbah debu preparasi ore relatif lebih rendah dibandingkan semen Portland. Kandungan Al_2O_3 pada sampel penelitian hanya berkisar antara 3,27–4,08%, sedangkan semen Portland mengandung sekitar 7,35%. Walaupun demikian, keberadaan aluminium oksida tetap memberikan kontribusi terhadap sifat kimia material karena Al_2O_3 merupakan salah satu komponen utama penyusun material pozzolan.

Perbedaan yang paling mencolok terlihat pada kandungan CaO. Semen Portland memiliki kandungan CaO sebesar 58,23%, sedangkan limbah debu preparasi ore hanya mengandung sekitar 0,09–0,14%. Rendahnya kandungan CaO menunjukkan bahwa limbah debu preparasi ore tidak dapat berfungsi sebagai bahan pengikat utama sebagaimana semen Portland. CaO merupakan oksida yang sangat berperan dalam pembentukan senyawa C-S-H dan Calcium Hydroxide ($Ca(OH)_2$) selama proses hidrasi semen. Oleh karena itu, rendahnya kandungan CaO menyebabkan limbah debu preparasi ore lebih sesuai digunakan sebagai bahan substitusi parsial dibandingkan sebagai pengganti semen secara keseluruhan.



Gambar 4. Total Oksida Pozzolan

Selain itu, kandungan MgO pada limbah debu preparasi ore berkisar antara 19,42–26,25%, jauh lebih tinggi dibandingkan semen Portland yang hanya sekitar 2,80%. Kandungan MgO yang cukup tinggi menunjukkan bahwa limbah debu preparasi ore masih mengandung mineral magnesium dalam jumlah yang cukup besar. Dalam penggunaan sebagai material substitusi semen, kandungan MgO perlu diperhatikan karena kadar yang terlalu tinggi berpotensi memengaruhi stabilitas volume material apabila digunakan dalam jumlah yang besar. Oleh sebab itu, pemanfaatan limbah debu preparasi ore sebaiknya dilakukan dalam proporsi tertentu sehingga tidak menurunkan kualitas produk beton yang dihasilkan.

Secara keseluruhan, hasil perbandingan menunjukkan bahwa limbah debu preparasi ore memiliki beberapa kesamaan komponen utama dengan semen Portland, terutama keberadaan SiO_2, Fe_2O_3, dan Al_2O_3. Meskipun komposisi setiap oksida tidak sama dengan semen Portland, keberadaan oksida-oksida tersebut menunjukkan bahwa limbah debu preparasi ore memiliki peluang untuk dimanfaatkan sebagai bahan substitusi parsial semen setelah mempertimbangkan komposisi campuran yang sesuai.

Evaluasi Potensi Limbah Debu Preparasi Ore Sebagai Substitusi Parsial Semen

Evaluasi potensi limbah debu preparasi ore sebagai bahan substitusi parsial semen dilakukan berdasarkan kandungan oksida utama yang diperoleh dari hasil analisis X-Ray Fluorescence (XRF). Parameter yang digunakan dalam penelitian ini meliputi kandungan SiO_2, Al_2O_3, dan Fe_2O_3, yang dikenal sebagai oksida utama penyusun material pozzolan. Ketiga oksida tersebut memiliki peran penting dalam meningkatkan reaktivitas material terhadap senyawa kalsium hidroksida hasil hidrasi semen sehingga dapat membentuk senyawa pengikat tambahan yang berkontribusi terhadap peningkatan sifat mekanik beton.

Berdasarkan hasil perhitungan total oksida pozzolan, diperoleh nilai sebesar 63,64% pada sampel low grade, 64,67% pada medium grade, dan 65,10% pada high grade. Hasil tersebut menunjukkan adanya peningkatan total kandungan oksida utama seiring meningkatnya grade ore. Meskipun peningkatannya relatif kecil, kecenderungan tersebut menunjukkan bahwa variasi kadar ore memberikan pengaruh terhadap komposisi kimia limbah debu preparasi ore.

Peningkatan total oksida pozzolan terutama dipengaruhi oleh meningkatnya kandungan Fe_2O_3 pada sampel medium grade dan high grade. Di sisi lain, kandungan SiO_2 memang mengalami penurunan, namun masih berada pada kisaran yang cukup tinggi sehingga tetap memberikan kontribusi terhadap total oksida pozzolan. Kandungan Al_2O_3 relatif stabil pada ketiga variasi sampel sehingga tidak memberikan perubahan yang signifikan terhadap total oksida.

Keberadaan SiO_2, Al_2O_3, dan Fe_2O_3 dalam jumlah yang cukup besar menunjukkan bahwa limbah debu preparasi ore memiliki karakteristik kimia yang mendukung penggunaannya sebagai material substitusi parsial semen. Silika berperan dalam pembentukan senyawa C-S-H, sedangkan aluminium oksida dan besi oksida berkontribusi terhadap pembentukan fase hidrat lainnya yang memengaruhi sifat mekanik material berbasis semen. Oleh karena itu, kandungan oksida utama yang dimiliki limbah debu preparasi ore memberikan indikasi bahwa material tersebut memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan tambahan pada campuran semen.

Namun demikian, hasil penelitian juga menunjukkan bahwa kandungan CaO pada limbah debu preparasi ore sangat rendah dibandingkan semen Portland. Kondisi tersebut menyebabkan limbah ini tidak mampu menggantikan fungsi semen secara penuh karena tidak memiliki kandungan kalsium yang cukup untuk membentuk senyawa hidrasi utama.

Berdasarkan hasil analisis XRF, kandungan CaO pada limbah debu preparasi ore berada pada kisaran 0,09–0,14%, sedangkan kandungan MgO berada pada kisaran 19,42–26,25%. Nilai

tersebut menunjukkan bahwa limbah debu preparasi ore memiliki karakteristik kimia yang berbeda dibandingkan semen Portland, yang umumnya mengandung CaO sekitar 58–67% dan MgO kurang dari 5%.

Kandungan CaO yang sangat rendah menunjukkan bahwa limbah debu preparasi ore tidak dapat berfungsi sebagai sumber utama kalsium dalam proses hidrasi semen. Padahal, CaO merupakan komponen utama pembentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang berperan dalam perkembangan kekuatan beton. Oleh karena itu, limbah debu preparasi ore lebih tepat dimanfaatkan sebagai bahan substitusi parsial semen daripada sebagai pengganti utama semen Portland.

Sementara itu, kandungan MgO yang relatif tinggi perlu menjadi perhatian karena MgO bebas (free MgO) dalam jumlah berlebihan dapat mengalami hidrasi secara lambat membentuk $Mg(OH)_2$ yang berpotensi menyebabkan ekspansi volume pada material semen. Namun demikian, pengaruh tersebut tidak dapat disimpulkan hanya berdasarkan hasil analisis XRF, karena XRF hanya menunjukkan komposisi unsur atau oksida total dan tidak dapat membedakan apakah MgO berada dalam bentuk bebas atau telah terikat di dalam struktur mineral. Oleh sebab itu, diperlukan pengujian lanjutan, seperti analisis mineralogi menggunakan XRD maupun pengujian sifat mekanik mortar atau beton, untuk memastikan pengaruh MgO terhadap performa material.

Hasil ini sejalan dengan ASTM C150 yang membatasi kandungan MgO pada semen Portland sekitar 5–6%, sedangkan pada material substitusi semen, pengaruh MgO sangat bergantung pada bentuk mineralnya dan tingkat reaktivitasnya. Dengan demikian, pemanfaatan limbah debu preparasi ore lebih tepat diarahkan sebagai bahan substitusi parsial semen, bukan sebagai pengganti semen secara keseluruhan.

Adapun pengaruh komposisi oksida terhadap aktivitas Pozzolan yaitu SiO_2, Al_2O_3, dan Fe_2O_3. Silika (SiO_2) merupakan komponen utama yang berperan dalam reaksi pozzolan melalui pembentukan senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H), sedangkan Al_2O_3 berkontribusi terhadap pembentukan senyawa kalsium aluminat hidrat (C-A-H) yang dapat meningkatkan kekuatan dan stabilitas material.

Sebaliknya, Fe_2O_3 tidak berperan secara langsung dalam reaksi pozzolan, tetapi keberadaannya dapat memengaruhi karakteristik kimia serta mineralogi material. Oleh karena itu, evaluasi potensi limbah debu preparasi ore tidak hanya ditentukan oleh tingginya kandungan satu oksida tertentu, melainkan oleh kombinasi kandungan SiO_2, Al_2O_3, dan Fe_2O_3 sebagai total oksida pozzolan.

Adapun hubungan kandungan Fe_2O_3 dengan Variasi Grade Ore pada penelitian ini menunjukkan bahwa kandungan Fe_2O_3 meningkat dari 18,45% pada sampel low grade menjadi 25,87% pada sampel high grade. Hasil ini berbeda dengan kecenderungan umum pada endapan nikel laterit, dimana peningkatan kadar Ni sering diikuti oleh penurunan kadar Fe akibat perbedaan zona mineralisasi antara limonit dan saprolit.

Perbedaan tersebut diduga disebabkan oleh objek penelitian yang berupa limbah debu preparasi ore, sehingga komposisi kimia yang diperoleh tidak sepenuhnya mencerminkan komposisi bijih asal. Selain itu, proses preparasi seperti penghancuran, penghalusan, dan pengayakan dapat memengaruhi distribusi mineral pada fraksi halus yang dianalisis. Variasi lokasi pengambilan sampel maupun karakteristik geologi bahan baku juga diduga berkontribusi terhadap tingginya kandungan Fe_2O_3 pada sampel high grade. Oleh karena itu, hasil penelitian ini lebih menggambarkan karakteristik limbah debu preparasi ore yang dianalisis daripada kecenderungan umum endapan nikel laterit.

Hal ini juga sejalan dengan penelitian Amalia (2011) yang menyatakan bahwa limbah industri yang mengandung oksida utama memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan tambahan pada material berbasis semen setelah dilakukan karakterisasi komposisi kimia. Selain itu, penelitian Dobiszewska dkk. (2023) juga menyebutkan bahwa limbah mineral yang kaya akan oksida silika dan besi berpotensi dimanfaatkan sebagai material konstruksi ramah lingkungan melalui konsep pemanfaatan kembali (waste utilization). Dengan demikian, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa limbah debu preparasi ore memiliki peluang untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai material alternatif pada industri semen dan beton, khususnya dalam mendukung konsep ekonomi sirkular dan pemanfaatan limbah industri secara berkelanjutan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai potensi limbah debu preparasi ore sebagai bahan substitusi parsial semen menggunakan metode X-Ray Fluorescence (XRF), maka dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Hasil analisis XRF menunjukkan bahwa limbah debu preparasi ore mengandung oksida utama berupa SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, MgO, dan CaO dengan komposisi yang berbeda pada setiap variasi grade ore. Kandungan SiO_2 mengalami penurunan dari 41,25% pada low grade menjadi 35,15% pada high grade. Sebaliknya, kandungan Fe_2O_3 meningkat dari 18,45% menjadi 25,87%, sedangkan MgO meningkat dari 19,42% menjadi 26,25%. Kandungan Al_2O_3 relatif stabil, sementara CaO berada pada kisaran 0,09–0,14%.
2. Variasi grade ore memberikan pengaruh terhadap komposisi kimia limbah debu preparasi ore. Semakin tinggi grade ore, kandungan Fe_2O_3 dan MgO cenderung meningkat, sedangkan kandungan SiO_2 mengalami penurunan. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa karakteristik mineral penyusun limbah dipengaruhi oleh kadar bijih yang diproses.
3. Total oksida pozzolan (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3) pada limbah debu preparasi ore berturut-turut sebesar 63,64% (low grade), 64,67% (medium grade), dan 65,10% (high grade). Hasil tersebut menunjukkan bahwa seluruh sampel memiliki kandungan oksida utama yang cukup tinggi sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan substitusi parsial semen.
4. Berdasarkan perbandingan komposisi kimia dengan semen Portland, limbah debu preparasi ore memiliki kandungan SiO_2 dan Fe_2O_3 yang relatif tinggi, namun kandungan CaO sangat rendah dibandingkan semen Portland. Oleh karena itu, limbah debu preparasi ore lebih berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan substitusi parsial semen daripada sebagai pengganti utama semen Portland.

DAFTAR PUSTAKA

Amalia. 2011. Studi Potensi Limbah Debu Pengolahan Baja (Dry Dust Collector) sebagai Bahan Tambah pada Beton. Poli Teknologi, Vol. 10, No. 1, hlm. 75–82.

Amjad, H., Abd-Elaal, E. S., Ma, X., Benn, T., & Fisher, M. (2025). A critical review of iron ore tailings as cement and aggregate substitutes for robust infrastructure: Mechanical, durability, eco-economic, and social impacts. *Journal of Cleaner Production*, *492*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144853

Apsari, M., Banu, P., Handono, D., & Pandaleke, R. (2019). UJI EKSPERIMENTAL KUAT TEKAN BETON DAUR ULANG DENGAN BAHAN TAMBAH ABU TERBANG (FLY ASH) DAN SERBUK KACA SEBAGAI SUBSTITUSI PARSIAL SEMEN. *Jurnal Sipil Statik*, *7*(1), 57–66.

Berkelanjutan, J. T., Kadarningsih, R., Bolota, D. A. S., & Kadarningsih, R. (t.t.). Potensi Limbah Fly Ash PLTU Anggrek, Gorontalo Utara sebagai Bahan Substitusi Semen Pada Beton. *Sustainable Technology Journal*, *13*(1), 10–15. Diambil http://jtb.ulm.ac.id/index.php/JTB

Damascus, M., Soloman, M., & Shepherd, C. (2024, Desember 23). *Recycling of Cement Kiln Dust as a Substitute for Limestone in Cement Chemistry Circular Economy*. https://doi.org/10.46254/au03.20240112

Dobiszewska, M., Bagcal, O., Beycioğlu, A., Goulias, D., Köksal, F., Płomiński, B., & Ürünveren, H. (2023). Utilization of rock dust as cement replacement in cement composites: An alternative approach to sustainable mortar and concrete productions. Dalam *Journal of Building Engineering* (Vol. 69). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106180

Firdaus, F., Thamsi, A.B., dan Badduwahe, H. 2024. Korelasi MgO dan SiO_2 Terhadap Kadar Ni dan Fe Pada Endapan Nikel Laterit di PT MKAL. Jurnal GEOSAPTA, Vol. 10, No. 1, hlm. 25–30.

Irshidat, M. R., & Al-Nuaimi, N. (2020). Industrial waste utilization of carbon dust in sustainable cementitious composites production. *Materials*, *13*(15). https://doi.org/10.3390/MA13153295

Pratiwi, W. D., Santoso, M. Y., Purwanti, E. P., & Setiawan, A. (2024). PENYULUHAN METODE MUDAH DAN PRAKTIS KARAKTERISASI FLY ASH SEBAGAI BAHAN SUBSTITUSI SEMEN. *RESWARA: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, *5*(1), 93–101. https://doi.org/10.46576/rjpkm.v5i1.3681

Ramanathan, S., Perumal, P., Illikainen, M., & Suraneni, P. (2021). Mechanically Activated Mine Tailings for Use as Supplementary Cementitious Materials. RILEM Technical Letters, 6, 61–69.

Recycling of Mine Tailings as Supplementary Cementitious Material: Impact of Mine Tailings' Mineralogy on Hydration Behaviour and Phase Assemblage of Ordinary Portland Cement Blends. *Cleaner Materials*, 2025. https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100288

Rogo, K. U., Aliyu, H., Mamman Wakawa, Y., & Saleh, S. (2023). Microstructural Characterization of Cement Kiln Dust as a Mineral Filler for Asphalt Production. Dalam *Nuhu Bamalli Polytechnic Journal of Science and Technology* (Vol. 1, Nomor 4).

Simonsen, A. M. T., Solismaa, S., Hansen, H. K., & Jensen, P. E. (2020). Evaluation of mine tailings' potential as supplementary cementitious materials based on chemical, mineralogical and physical characteristics. Waste Management, 102, 710–721. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.037

Tunas Niaga Konstruksindo. 2023. Mengenal Semen Portland. Diakses dari Tunas Niaga Konstruksindo pada tanggal 13 Juni 2026.

Wijaya, R. A., Wijayanti, S., & Astuti, Y. (2021). Fly Ash Limbah Pembakaran Batubara sebagai Zat Mineral Tambahan (Additive) untuk Perbaikan Kualitas dan Kuat Tekan Semen. Dalam *Media Komunikasi Teknik Sipil* (Vol. 27, Nomor 1).

Zarzuela, R., Luna, M., Carrascosa, L. M., Yeste, M. P., Garcia-Lodeiro, I., Blanco-Varela, M. T., Cauqui, M. A., Rodríguez-Izquierdo, J. M., & Mosquera, M. J. (2020). Producing C-S-H gel by reaction between silica oligomers and portlandite: A promising approach to repair cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, *130*. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106008

Zhao, Y., Goulias, D., Dobiszewska, M., & Modrzyński, P. (2022). Life-Cycle Sustainability Assessment of Using Rock Dust as a Partial Replacement of Fine Aggregate and Cement in Concrete Pavements. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(19). https://doi.org/10.3390/su141912449