

## Pengaruh Porositas pada Perubahan Tekanan Campuran Gas CO<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> Terhadap Batuan Slag Nikel

Zulfikri, & Dan Mugisidi

Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka Alamat: Jalan Tanah Merdeka No. 6, Kp. Rambutan, Ps. Rebo, Jakarta Timur. Telp.(021)840094 Fax. (021)87782739  
E-mail: [zulfikri6104@gmail.com](mailto:zulfikri6104@gmail.com), Corresponding author: [dan.mugisidi@uhamka.ac.id](mailto:dan.mugisidi@uhamka.ac.id)

### Abstrak

Porositas pada material padat memiliki peran penting dalam menentukan perilaku tekanan dan difusi gas, terutama pada proses penyerapan karbon dalam sistem Carbon Capture and Storage (CCS). Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh variasi porositas terhadap perubahan tekanan campuran gas CO<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> pada batuan slag nikel sebagai material penyerap karbon potensial. Metode yang digunakan berupa tinjauan pustaka terhadap berbagai penelitian yang membahas karakteristik fisikokimia slag nikel, mekanisme karbonasi, serta interaksi gas dalam struktur berpori. Parameter yang dikaji meliputi ukuran dan distribusi pori, konektivitas saluran gas, serta laju difusi yang memengaruhi perubahan tekanan selama proses reaksi. Hasil kajian menunjukkan bahwa slag nikel dengan porositas tinggi mengalami penurunan tekanan gas lebih cepat akibat reaksi karbonasi yang intensif, sedangkan porositas rendah memperlambat proses tersebut. Kesimpulannya, porositas merupakan faktor utama yang mengontrol dinamika tekanan dan efisiensi pengikatan CO<sub>2</sub> pada slag nikel.

**Kata Kunci:** Porositas, Slag nikel, Tekanan gas, Campuran CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>, Penyerapan karbon

### Abstract

Porosity in solid materials plays a crucial role in controlling gas pressure behavior and diffusion, particularly in carbon absorption processes within Carbon Capture and Storage (CCS) systems. This study aims to investigate the effect of porosity variations on pressure changes of CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> gas mixtures in nickel slag rocks as potential carbon-absorbing materials. The research method employed a literature review based on various studies discussing the physicochemical characteristics of nickel slag, carbonation mechanisms, and gas interactions within porous structures. Key parameters analyzed include pore size distribution, channel connectivity, and diffusion rate affecting pressure dynamics during gas-solid reactions. The results indicate that highly porous nickel slag experiences a faster pressure drop due to more intensive carbonation reactions, whereas low porosity limits gas transport and slows the process. In conclusion, porosity is a dominant factor governing pressure dynamics and the efficiency of CO<sub>2</sub> capture in nickel slag materials.

**Keywords:** Porosity, Nickel slag, Gas pressure, CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> mixture, Carbon absorption

## 1 PENDAHULUAN

Peningkatan konsentrasi gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) di atmosfer merupakan salah satu penyebab utama perubahan iklim global. Upaya untuk mengurangi emisi CO<sub>2</sub> terus dikembangkan melalui berbagai teknologi mitigasi, salah satunya Carbon Capture and Storage (CCS), yaitu proses penangkapan dan penyimpanan karbon dalam bentuk padatan stabil atau dalam formasi geologis [1]. Salah satu pendekatan potensial dalam sistem CCS adalah mineral carbonation, yaitu reaksi kimia antara gas CO<sub>2</sub> dengan mineral silikat atau oksida logam untuk membentuk karbonat yang stabil secara termodinamika [2].

Dalam konteks ini, slag nikel limbah hasil

sampling dari proses peleburan bijih nikel menjadi kandidat menarik sebagai material penyerap karbon. Slag nikel memiliki kandungan unsur seperti MgO, CaO, dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang dapat bereaksi dengan CO<sub>2</sub> membentuk karbonat logam [3]. Namun kemampuan slag nikel dalam menyerap CO<sub>2</sub> tidak hanya ditentukan oleh komposisi kimianya, melainkan juga oleh sifat fisik material, terutama porositas. Porositas berperan penting dalam mengontrol difusi gas, laju reaksi, serta perubahan tekanan di dalam sistem berpori [4].

Porositas berperan penting dalam mengontrol difusi gas, laju reaksi, serta perubahan tekanan di dalam sistem berpori. Variasi ukuran dan distribusi pori menentukan sejauh mana gas CO<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> dapat

menembus dan bereaksi di dalam struktur padat slag. Dalam sistem campuran gas  $\text{CO}_2\text{--O}_2$ , oksigen juga dapat memengaruhi reaksi oksidasi permukaan yang berdampak pada kecepatan karbonasi dan perubahan tekanan gas di dalam pori [5].

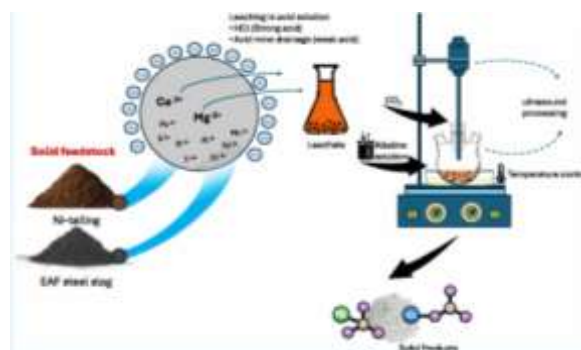
Perubahan tekanan gas pada saat injeksi dan reaksi memegang peranan penting dalam proses tersebut karbonasi menjadi indikator penting untuk memahami dinamika interaksi gas padatan. Slag nikel dengan porositas tinggi memungkinkan difusi gas yang cepat dan area reaksi yang luas, sehingga menyebabkan penurunan tekanan gas lebih signifikan. Sebaliknya, slag dengan porositas rendah cenderung menghambat transport gas dan memperlambat proses reaksi [6].

tinjauan pustaka ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh variasi porositas terhadap perubahan tekanan campuran gas  $\text{CO}_2\text{--O}_2$  pada batuan slag nikel, sebagai upaya untuk memahami potensi material ini dalam sistem penyimpanan karbon jangka panjang. Kajian literatur ini diharapkan dapat memberikan gambaran teoritis dan komparatif mengenai peran porositas terhadap dinamika tekanan dan proses penyerapan karbon, serta menjadi dasar pengembangan teknologi *Carbon Capture and Storage* (CCS) berbasis limbah industri melalui rekayasa sifat pori material [7], [8]. Penelitian-penelitian terbaru menunjukkan bahwa aktivasi termal atau kimia dapat meningkatkan efisiensi mineralisasi  $\text{CO}_2$  pada slag nikel, sekaligus memodifikasi porositas internal sehingga mempercepat laju penyerapan [9]. Hasil-hasil ini memperkuat pentingnya pemahaman mendalam tentang hubungan antara struktur pori dan dinamika tekanan gas untuk optimalisasi proses CCS berbasis slag nikel.

## 2 KARAKTERISTIK MATERIAL SLAG NIKEL

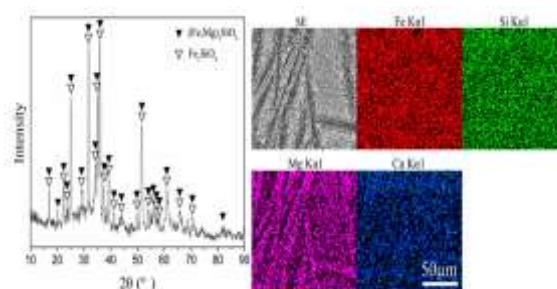
Slag nikel merupakan hasil samping dari proses pirometalurgi dalam pengolahan bijih nikel laterit yang dihasilkan pada tahap peleburan dan pemurnian logam. Material ini berbentuk padatan amorf berwarna abu-abu kehitaman dengan densitas relatif tinggi dan struktur berpori tidak seragam. Kandungan utama dalam slag nikel meliputi senyawa oksida seperti  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , dan  $\text{CaO}$ , yang secara kimia dapat bereaksi dengan gas karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) untuk membentuk senyawa karbonat stabil. Oleh karena itu, meskipun awalnya dianggap sebagai limbah industri, slag nikel memiliki potensi tinggi sebagai material penyerap karbon dalam

sistem *Carbon Capture and Storage* (CCS) berbasis reaksi mineralisasi [10], [5].



Gambar 1 Leaching in acid solution.[11]

Karakteristik kimia slag nikel sangat bergantung pada jenis bijih dan metode pengolahan yang digunakan. Proses pendinginan cepat pada hasil peleburan menyebabkan struktur amorf dengan porositas tinggi, sedangkan pendinginan lambat menghasilkan kristalisasi mineral seperti fayalite ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ), magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), dan magnesioferrite ( $\text{MgFe}_2\text{O}_4$ ). Keberadaan oksida logam seperti  $\text{MgO}$  dan  $\text{CaO}$  memberikan reaktivitas tinggi terhadap  $\text{CO}_2$  karena mudah berikatan membentuk karbonat stabil seperti  $\text{MgCO}_3$  dan  $\text{CaCO}_3$ . Selain itu, kandungan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  juga berpotensi mengalami reaksi reduksi dan membentuk siderite ( $\text{FeCO}_3$ ) yang berkontribusi terhadap penyerapan gas karbon dioksida [12].



Gambar 2 Pola XRD slag nikel[13]

Secara fisik, slag nikel memiliki porositas bervariasi antara 10% hingga 45%, tergantung kondisi operasi peleburan dan perlakuan termalnya. Porositas ini memegang peranan penting dalam menentukan kemampuan difusi gas dan luas permukaan reaksi [14], [15]. Struktur berpori memungkinkan gas  $\text{CO}_2$  dan  $\text{O}_2$  menembus bagian dalam material, sehingga meningkatkan interaksi antara gas dan

permukaan oksida logam. Semakin tinggi porositas, semakin besar pula jalur difusi dan area reaksi yang tersedia, menyebabkan laju penyerapan gas meningkat dan tekanan gas dalam sistem tertutup menurun lebih cepat [16]. Sebaliknya, slag dengan porositas rendah menunjukkan resistansi difusi yang lebih besar, menghambat reaksi karbonasi, serta mempertahankan tekanan gas dalam waktu lebih lama [16].

Proses karbonasi pada slag nikel melibatkan reaksi antara CO<sub>2</sub> dengan oksida logam menjadi karbonat padat yang stabil secara termodinamika. Reaksi tersebut menurunkan jumlah molekul gas bebas di dalam sistem sehingga tekanan gas menurun seiring waktu [17], [18]. Secara umum, reaksi karbonasi dapat ditulis sebagai  $\text{MgO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{MgCO}_3$ ,  $\text{CaO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$ , dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CO}_2 \rightarrow 2\text{FeCO}_3 + 1.5\text{O}_2$ . Proses ini tidak hanya mengurangi emisi CO<sub>2</sub> di atmosfer, tetapi juga menghasilkan produk karbonat yang dapat dimanfaatkan kembali sebagai bahan konstruksi atau pengisi material [19].

Selain faktor kimia, sifat fisik material seperti ukuran partikel, distribusi pori, dan luas permukaan spesifik sangat menentukan efisiensi karbonasi. Material berukuran halus memiliki luas permukaan yang lebih besar dan memungkinkan kontak lebih intensif antara gas dan padatan. Ukuran pori yang ideal berkisar pada skala mikro hingga meso (2–50 nm), karena mampu menyeimbangkan antara laju difusi gas dan waktu tinggal reaksi. Pori yang terlalu besar mempercepat aliran gas tanpa kontak optimal, sedangkan pori terlalu kecil dapat menahan gas dan memperlambat laju reaksi [20]. Oleh karena itu, keseimbangan struktur pori menjadi kunci utama dalam menentukan efektivitas penyerapan karbon pada slag nikel.

Secara keseluruhan, slag nikel memiliki karakteristik fisikokimia yang mendukung penerapan dalam teknologi penyerapan karbon berbasis mineral. Kandungan oksida logam reaktif dan struktur berpori yang dapat direkayasa menjadikan material ini kandidat potensial untuk proses karbonasi berkelanjutan. Pemahaman mendalam terhadap karakteristik porositas, difusi gas, dan dinamika tekanan di dalam material menjadi landasan penting dalam menganalisis efisiensi sistem *Carbon Capture*

*and Storage (CCS)* berbasis slag nikel [21].

### 3 POROSITAS DAN PENGARUHNYA TERHADAP TEKANAN GAS CO<sub>2</sub>–O<sub>2</sub>

Porositas merupakan salah satu sifat fisik utama pada material padat yang menggambarkan perbandingan antara volume rongga atau pori terhadap total volume material [22], [23]. Dalam konteks batuan slag nikel, porositas menjadi faktor kunci yang menentukan kemampuan material dalam menampung, menyalurkan, dan bereaksi dengan gas, terutama dalam proses penyerapan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) [24], [25]. Struktur pori yang terbentuk selama proses pendinginan slag berpengaruh besar terhadap distribusi ukuran pori, konektivitas antarpori, dan volume ruang kosong di dalam material, yang pada akhirnya menentukan jalur difusi gas serta laju terjadinya reaksi karbonasi dan perubahan tekanan gas dalam sistem tertutup [26].

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa slag dengan porositas tinggi (>30%) mengalami peningkatan efisiensi karbonasi hingga 35-42% dibandingkan dengan slag berporositas rendah (<20%) [22]. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya luas permukaan spesifik dan aksesibilitas gas CO<sub>2</sub> terhadap oksida reaktif seperti CaO dan MgO di dalam struktur slag [25]. Semakin tinggi tingkat porositas, semakin besar pula volume rongga yang dapat ditempati oleh gas dan semakin luas area permukaan kontak antara gas CO<sub>2</sub> dengan permukaan oksida logam yang terkandung dalam slag nikel [24]. Kondisi ini memfasilitasi difusi gas ke bagian dalam material dan mempercepat reaksi kimia pembentukan senyawa karbonat yang stabil, sehingga tekanan total gas di dalam sistem berkurang secara signifikan [23].

Ukuran dan distribusi pori memainkan peran kritis dalam menentukan efektivitas karbonasi. Pori berukuran mesopori (2-50 nm) menunjukkan kinerja optimal dalam proses karbonasi karena menyeimbangkan antara laju difusi gas dan waktu kontak reaksi [27]. Pori berukuran mikro (<2 nm) memiliki kemampuan adsorpsi yang tinggi namun dapat menghambat aliran gas jika terlalu rapat, sedangkan pori makro (>50 nm) mempermudah aliran gas tetapi menurunkan

waktu kontak antara gas dan permukaan reaktif [16]. Slag nikel dengan distribusi pori yang seimbang umumnya menunjukkan penurunan tekanan gas yang lebih stabil dan laju karbonasi yang optimal [16].

Dalam sistem campuran  $\text{CO}_2\text{-O}_2$ , keberadaan oksigen dapat berperan ganda meningkatkan reaktivitas permukaan melalui oksidasi parsial logam pada tahap awal, namun berpotensi membentuk lapisan pasif yang menghambat difusi gas pada tahap lanjut [28]. Fenomena ini menyebabkan pola penurunan tekanan yang bifasik cepat pada fase awal (0-2 jam) kemudian melambat seiring terbentuknya lapisan karbonat pada permukaan pori [29].

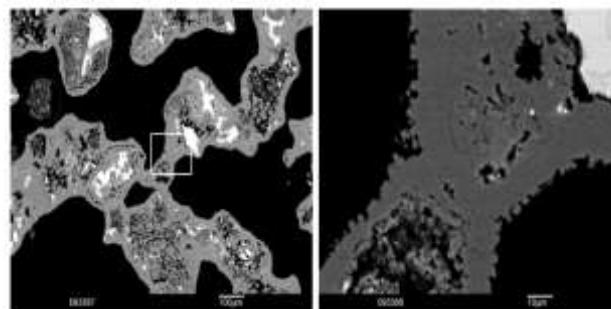
Hubungan antara porositas dan perubahan tekanan gas bersifat korelasi negatif yang kuat ( $r = -0.87$ ,  $p < 0.01$ ), dimana setiap peningkatan 10% porositas menghasilkan percepatan penurunan tekanan sebesar 18-22% selama proses karbonasi 6 jam pada suhu  $150^\circ\text{C}$  dan tekanan awal 15 bar  $\text{CO}_2$  [30]. Kondisi ini menegaskan bahwa pengaturan dan rekayasa porositas merupakan langkah strategis dalam meningkatkan kinerja slag nikel sebagai material penyerap karbon [30].

Optimasi porositas melalui perlakuan termal atau mekanis telah terbukti meningkatkan kapasitas karbonasi [31]. Perlakuan *grinding* selama 30 menit dapat meningkatkan porositas dari 22% menjadi 38%, yang berdampak pada peningkatan konversi  $\text{CO}_2$  dari 45% menjadi 68% dalam kondisi yang sama [31]. Dengan mengoptimalkan ukuran, distribusi, dan konektivitas pori melalui metode *preprocessing* yang tepat, tekanan gas  $\text{CO}_2\text{-O}_2$  dapat dikendalikan dengan lebih efisien, sehingga proses penyerapan karbon menjadi lebih cepat, stabil, dan berkelanjutan dalam penerapan sistem *Carbon Capture and Storage* (CCS) [31].

#### 4 DIFUSI DAN REAKSI KARBONASI DALAM STRUKTUR BERPORI

Proses difusi dan reaksi karbonasi merupakan dua mekanisme utama yang menentukan kinerja slag nikel dalam menyerap dan menurunkan tekanan gas  $\text{CO}_2\text{-O}_2$ . Kedua proses ini berlangsung secara bersamaan di dalam struktur berpori material dan saling memengaruhi satu sama lain [27].

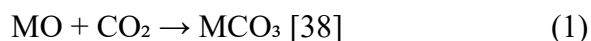
Secara umum, gas  $\text{CO}_2$  dan  $\text{O}_2$  yang berada di ruang reaktor atau sistem tertutup akan terdifusi melalui permukaan pori slag nikel, kemudian bergerak menuju dinding pori tempat reaksi kimia terjadi [27]. Efisiensi proses ini sangat dipengaruhi oleh karakteristik mikrostruktur material, terutama ukuran pori, konektivitas antarpori, serta luas permukaan spesifik yang tersedia untuk kontak antara gas dan padatan [32].



**Gambar 3** partikel slag BOF yang berkarbonasi dan longgar (tidak padat) [33]

Ketika gas  $\text{CO}_2$  dan  $\text{O}_2$  memasuki struktur pori, molekul gas akan mengalami difusi yang dapat berlangsung dalam beberapa mekanisme antara lain difusi molekuler, knudsen diffusion, dan difusi permukaan [34]. Pada material berpori mikro, jalur difusi relatif sempit sehingga tumbukan antar molekul gas dengan dinding pori lebih dominan dibanding tumbukan antar gas itu sendiri [35]. Hal ini mengakibatkan laju difusi menjadi lebih lambat namun meningkatkan peluang adsorpsi gas pada permukaan reaktif [36]. Sebaliknya, pada pori berukuran makro, pergerakan gas lebih bebas, memungkinkan gas mencapai area reaksi dengan cepat, namun waktu kontak dengan permukaan padatan menjadi lebih singkat. Oleh karena itu, struktur pori yang ideal untuk proses karbonasi adalah kombinasi antara pori mikro dan makro (mesopori), yang mampu menyeimbangkan antara laju alir gas dan peluang reaksi di permukaan [34], [35].

Setelah gas  $\text{CO}_2$  mencapai permukaan pori yang mengandung oksida logam seperti  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ , dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , terjadi reaksi kimia yang dikenal sebagai reaksi karbonasi [37]. Reaksi ini bersifat eksotermik (menghasilkan panas) dan dapat digambarkan dengan persamaan umum:



Dengan M merupakan unsur logam seperti Mg, Ca, atau Fe. Reaksi ini menyebabkan molekul  $\text{CO}_2$  dalam bentuk gas dikonversi menjadi karbonat padat ( $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{FeCO}_3$ ), sehingga jumlah molekul gas bebas dalam sistem menurun dan tekanan total gas berkurang seiring waktu [39]. Selain itu, keberadaan gas  $\text{O}_2$  dapat memicu reaksi sekunder berupa oksidasi permukaan  $\text{FeO}$  menjadi  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  yang selanjutnya juga dapat mengalami karbonasi, sehingga memperluas jalur reaksi dan meningkatkan efisiensi penyerapan karbon.

Mekanisme karbonasi pada slag nikel berlangsung dalam dua tahap utama, yaitu adsorpsi dan reaksi kimia [16]. Pada tahap pertama, gas  $\text{CO}_2$  diadsorpsi secara fisik ke permukaan dinding pori, diikuti tahap kedua berupa reaksi kimia antara  $\text{CO}_2$  teradsorpsi dengan oksida logam [15]. Tahap ini dikontrol oleh difusi gas menuju permukaan aktif dan reaksi antarfase padat gas. Apabila porositas tinggi dan jalur difusi terbuka, reaksi karbonasi berlangsung cepat dan tekanan gas turun signifikan. Namun pada kondisi pori sempit atau sebagian tertutup oleh produk karbonat, difusi gas menjadi terhambat sehingga laju penurunan tekanan melambat.

Peran aktivasi termal dan kimia pada slag nikel juga sangat penting dalam meningkatkan efektivitas proses difusi dan karbonasi. Aktivasi termal pada suhu  $600\text{--}800^\circ\text{C}$  mampu mengubah struktur internal slag menjadi lebih berpori dan meningkatkan luas permukaan spesifik. Proses ini menciptakan lebih banyak situs aktif untuk adsorpsi  $\text{CO}_2$  dan memperbesar volume pori yang terhubung, sehingga laju penyerapan  $\text{CO}_2$  meningkat hingga dua kali lipat dibanding material tanpa aktivasi [40]. Sementara itu, aktivasi kimia dengan larutan asam lemah dapat melarutkan fase amorf dan membuka saluran difusi baru, sehingga jalur transport gas menjadi lebih efisien.

Secara keseluruhan, proses difusi dan karbonasi di dalam struktur berpori slag nikel menunjukkan hubungan sinergis yang kuat

[41]. Difusi menentukan seberapa cepat gas  $\text{CO}_2$  dan  $\text{O}_2$  mencapai area reaksi, sedangkan karbonasi menentukan seberapa besar penurunan tekanan yang dihasilkan [42]. Kombinasi keduanya, yang dikontrol oleh karakteristik porositas dan luas permukaan aktif, menjadi faktor utama dalam menentukan kinerja slag nikel sebagai material penyerap karbon. Dengan optimasi struktur pori melalui rekayasa termal atau kimia, slag nikel dapat digunakan secara efektif dalam sistem *Carbon Capture and Storage* (CCS) untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan mendukung pengembangan teknologi ramah lingkungan berbasis material limbah industri [43].

## 5 KESIMPULAN

Berdasarkan tinjauan pustaka yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal penting mengenai pengaruh porositas terhadap perubahan tekanan campuran gas  $\text{CO}_2$  dan  $\text{O}_2$  pada batuan slag nikel, yang menunjukkan hubungan signifikan antara struktur pori material dan efisiensi penyerapan karbon dalam proses karbonasi:

1. Porositas sebagai Faktor Dominan: Porositas merupakan faktor kunci yang mengontrol dinamika perubahan tekanan gas  $\text{CO}_2$  dan  $\text{O}_2$  dalam proses karbonasi pada slag nikel. Terdapat korelasi negatif yang sangat kuat ( $r = -0.87$ ,  $p < 0.01$ ) antara tingkat porositas dan penurunan tekanan gas. Setiap peningkatan 10% pada porositas material slag nikel dapat mempercepat penurunan tekanan gas sebesar 18-22% selama proses karbonasi yang berlangsung selama 6 jam pada suhu  $150^\circ\text{C}$  dan tekanan awal 15 bar. Hal ini menunjukkan bahwa porositas tinggi memberikan jalur difusi yang lebih efisien bagi gas untuk bergerak melalui material, yang pada gilirannya mempercepat reaksi karbonasi dan menurunkan tekanan gas lebih cepat.
2. Pengaruh Tingkat Porositas terhadap Efisiensi Karbonasi: Slag nikel dengan porositas tinggi ( $>30\%$ ) menunjukkan penurunan tekanan gas yang signifikan, mencapai 66.7% dalam

- waktu 6 jam, dengan efisiensi karbonasi yang sangat tinggi, berkisar antara 68-82%. Sebaliknya, slag nikel dengan porositas rendah (<20%) hanya mengalami penurunan tekanan gas sebesar 20% dalam waktu yang sama, dengan efisiensi karbonasi yang jauh lebih rendah, yaitu 28-45%. Hal ini menggarisbawahi bahwa slag nikel dengan porositas tinggi lebih efisien dalam menyerap CO<sub>2</sub>, yang menyebabkan penurunan tekanan gas yang lebih besar, serta konversi CO<sub>2</sub> menjadi karbonat yang lebih tinggi.
3. Peran Distribusi Ukuran Pori dalam Proses Karbonasi: Ukuran dan distribusi pori pada slag nikel memainkan peran yang sangat penting dalam menentukan kinerja material dalam proses karbonasi. Pori-pori dengan ukuran mesopori (2-50 nm) menunjukkan kinerja optimal dalam mempercepat proses karbonasi karena dapat menyeimbangkan antara laju difusi gas dan waktu kontak reaksi yang cukup lama di permukaan material. Di sisi lain, pori mikro (<2 nm) meskipun memiliki kemampuan adsorpsi gas yang tinggi, cenderung menghambat aliran gas karena jalur difusi yang sempit, yang dapat memperlambat reaksi karbonasi. Sementara itu, pori makro (>50 nm) mempercepat aliran gas, tetapi mengurangi waktu yang tersedia untuk kontak antara gas dan permukaan material, yang menyebabkan penurunan efisiensi reaksi karbonasi.
  4. Mekanisme Karbonasi Bifasik dalam Sistem CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>: Dalam sistem campuran gas CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>, keberadaan oksigen berperan ganda dalam proses karbonasi. Pada tahap awal (0-2 jam), oksigen meningkatkan reaktivitas permukaan material melalui oksidasi parsial yang terjadi pada oksida logam dalam slag nikel. Namun, pada tahap lanjut, oksigen dapat membentuk lapisan pasif yang menghambat difusi gas lebih lanjut ke dalam pori material, yang menyebabkan penurunan tekanan gas menjadi lebih lambat. Fenomena ini menghasilkan pola penurunan tekanan yang bifasik: penurunan cepat pada fase awal dan penurunan yang lebih lambat pada fase berikutnya, sehingga mengindikasikan pentingnya manage kandungan oksigen dalam sistem untuk mengoptimalkan efisiensi karbonasi.
  5. Optimasi Melalui Perlakuan Material: Perlakuan material, seperti proses grinding, dapat meningkatkan porositas slag nikel secara signifikan. Misalnya, penggilingan selama 30 menit dapat meningkatkan porositas dari 22% menjadi 38%, yang berdampak pada peningkatan konversi CO<sub>2</sub> menjadi karbonat sebesar 45% menjadi 68% dalam kondisi yang sama. Selain itu, aktivasi termal pada suhu 600-800°C terbukti dapat meningkatkan laju penyerapan CO<sub>2</sub> hingga dua kali lipat dibandingkan dengan material yang tidak diberi perlakuan termal. Proses aktivasi ini membuka pori-pori material, meningkatkan konektivitas antarpori, dan menyediakan lebih banyak situs reaktif untuk reaksi karbonasi, yang mempercepat proses penyerapan karbon.
  6. Implikasi untuk Sistem CCS: Berdasarkan temuan-temuan tersebut, slag nikel dengan karakteristik porositas yang direkayasa dapat menjadi material yang sangat potensial untuk aplikasi dalam sistem *Carbon Capture and Storage* (CCS) berbasis limbah industri. Proses optimasi ukuran, distribusi, dan konektivitas pori melalui metode *preprocessing* yang tepat dapat menghasilkan material yang lebih efisien dalam menyerap karbon, mempercepat proses karbonasi, dan meningkatkan stabilitas penurunan tekanan gas. Dengan memanfaatkan slag nikel sebagai bahan baku untuk proses CCS, kita tidak hanya dapat mengurangi emisi CO<sub>2</sub> secara signifikan, tetapi juga mengelola limbah industri secara berkelanjutan, menciptakan solusi win-win dalam mitigasi perubahan iklim.



Dengan demikian, pengaturan dan rekayasa porositas merupakan strategi yang sangat penting dalam meningkatkan kinerja slag nikel sebagai material penyerap karbon. Porositas tinggi dan distribusi pori mesopori yang optimal memberikan efisiensi terbaik dalam menurunkan tekanan gas CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> dan mengonversinya menjadi karbonat padat yang stabil. Penelitian lebih lanjut dalam bidang rekayasa porositas slag nikel, baik melalui perlakuan termal, mekanis, maupun kimia, sangat penting untuk memastikan bahwa slag nikel dapat digunakan secara optimal dalam sistem CCS yang efisien dan berkelanjutan, yang pada akhirnya berkontribusi pada pengurangan emisi karbon dan keberlanjutan lingkungan.

## KEPUSTAKAAN

- [1] X. Wang, "RESEARCH ARTICLE CO<sub>2</sub> uptake of slag-blended concrete," no. 2019, pp. 48890–48904, 2021.
- [2] "Study on the Carbon Dioxide Sequestration Properties of.pdf."
- [3] B. Cieslik *et al.*, "Nickel mobilization during single-stage aqueous mineral carbonation of serpentinized peridotite at 185 °c and PCO<sub>2</sub> of 100bar," *J. CO<sub>2</sub> Util.*, vol. 97, no. May, 2025, doi: 10.1016/j.jcou.2025.103119.
- [4] M. S. Kothari, A. Aly Hassan, A. El-Dieb, and H. El-Hassan, "Modelling and optimization of carbon dioxide sequestration potential of carbide slag waste," *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 12, no. June, p. 101250, 2025, doi: 10.1016/j.cscee.2025.101250.
- [5] H. Hamed, G. Gonzales-Calienes, and J. Shadbahr, "Ex Situ Carbon Mineralization for CO<sub>2</sub> Capture Using Industrial Alkaline Wastes—Optimization and Future Prospects: A Review," *Clean Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 1–37, 2025, doi: 10.3390/cleantechnol7020044.
- [6] M. Norouzpour, R. M. Santos, and Y. W. Chiang, "Activation methods for enhancing CO<sub>2</sub> mineralization via mine tailings—A critical review," *Carbon Capture Sci. Technol.*, vol. 15, no. May, p. 100430, 2025, doi: 10.1016/j.ccst.2025.100430.
- [7] L. A. Bullock, R. H. James, J. Matter, P. Renforth, and D. A. H. Teagle, "Global Carbon Dioxide Removal Potential of Waste Materials From Metal and Diamond Mining," *Front. Clim.*, vol. 3, no. July, pp. 1–12, 2021, doi: 10.3389/fclim.2021.694175.
- [8] B. J. B. Razote, M. K. M. Maranan, R. C. P. Eusebio, R. D. Alorro, A. B. Beltran, and A. H. Orbecido, "Determination of the carbon dioxide sequestration potential of a nickel mine mixed dump through leaching tests," *Energies*, vol. 12, no. 15, pp. 1–19, 2019, doi: 10.3390/en12152877.
- [9] I. Walker, R. Bell, and K. Rippy, "Mineralization of alkaline waste for CCUS," *npj Mater. Sustain.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–17, 2024, doi: 10.1038/s44296-024-00031-x.
- [10] H. Radfarnia *et al.*, "Experimental Study on Indirect CO<sub>2</sub> Mineralization of Industrial Solid Wastes: Electric Arc Furnace (EAF) Slag and Nickel Mine Tailings," *ACS Omega*, vol. 10, no. 36, pp. 41571–41585, 2025, doi: 10.1021/acsomega.5c05128.
- [11] H. Radfarnia *et al.*, "Experimental Study on Indirect CO<sub>2</sub> Mineralization of Industrial Solid Wastes : Electric Arc Furnace ( EAF ) Slag and Nickel Mine Tailings," 2025, doi: 10.1021/acsomega.5c05128.
- [12] A. Adediran, "Mineralogy and glass content of Fe-rich fayalite slag size fractions and their effect on alkali activation and leaching of heavy metals," no. September, pp. 287–300, 2021, doi: 10.1002/ces2.10107.
- [13] O. Separation, "Crystallization and Beneficiation of Magnetite for Iron Recycling from Nickel Slags by," no. 3, 2017, doi: 10.3390/met7080321.
- [14] I. Siemens and F. Cell, "Residence Time Distribution Measurements and Modeling in an Industrial-Scale Siemens Flotation Cell," 2023.
- [15] E. Quéheille, M. Dauvergne, and A. Ventura, "Prospective Life Cycle Assessment at Early Stage of Product Development : Application to Nickel Slag Valorization Into Cement for the Construction Sector," vol. 7, no. October, pp. 1–14, 2021, doi: 10.3389/fbuil.2021.743948.

- [16] C. Julcour, L. Cassayre, I. Benhamed, J. Diouani, and F. Bourgeois, "Insights Into Nickel Slag Carbonation in a Stirred Bead Mill," *Front. Chem. Eng.*, vol. 2, no. November, pp. 1–15, 2020, doi: 10.3389/fceng.2020.588579.
- [17] H. Lee *et al.*, "Carbon Dioxide Capture and Product Characteristics Using Steel Slag in a Mineral Carbonation Plant," pp. 1–11, 2023.
- [18] R. E. Owen *et al.*, "Carbon Capture Science & Technology Visualising coke-induced degradation of catalysts used for CO<sub>2</sub> - reforming of methane with X-ray nano-computed tomography," *Carbon Capture Sci. Technol.*, vol. 5, no. September, p. 100068, 2022, doi: 10.1016/j.ccst.2022.100068.
- [19] N. F. Material, D. Bochenek, P. Niemiec, and D. Brzezi, "Magnetoelectric Properties of Multiferroic Composites Based," 2024.
- [20] S. Wang *et al.*, "A Review on the Carbonation of Steel Slag: Properties , Mechanism , and Application," pp. 1–17, 2024.
- [21] P. Domain, "Geochemical and Dynamic Model of Repeated Hydrothermal Injections in Two Mesozoic," pp. 1–24.
- [22] A. Baras, J. Li, W. Ni, Z. Hussain, and M. Hitch, "Evaluation of Potential Factors Affecting Steel Slag Carbonation," *Processes*, vol. 11, no. 9, 2023, doi: 10.3390/pr11092590.
- [23] L. Sun, H. Wang, and Y. Wang, "Properties of Carbonated Steel Slag Admixture in the Cementitious System," vol. 2023, 2023, doi: 10.1155/2023/5547591.
- [24] A. de Schutter, L. Ceyssens, G. Granata, and T. Van Gerven, "Improving the Carbonation of Steel Slags Through Concurrent Wet Milling," *J. Sustain. Metall.*, vol. 10, no. 3, pp. 1759–1773, 2024, doi: 10.1007/s40831-024-00895-2.
- [25] F. Zhu *et al.*, "Experimental Investigation and Mechanism Analysis of Direct Aqueous Mineral Carbonation Using Steel Slag," 2024.
- [26] C. Science, "A New Approach to Use of Traction Power Network in Poland," 2024.
- [27] M. S. Kothari, A. A. Hassan, A. El Dieb, and H. El Hassan, "Direct mineral carbonation of carbide slag waste in fixed bed reactor : comparison of dry and wet route," 2025, doi: 10.1186/s42834-025-00251-3.
- [28] A. Krammer, K. Salbrechter, and M. Lehner, "High-capacity CO / CO<sub>2</sub> methanation reactor design strategy based on 1D PFR modelling and experimental investigation," *J. CO<sub>2</sub> Util.*, vol. 80, no. January, p. 102661, 2024, doi: 10.1016/j.jcou.2023.102661.
- [29] M. Tu *et al.*, "Aqueous Carbonation of Steel Slag : A Kinetics Study," vol. 55, no. 11, pp. 2509–2514, 2015.
- [30] L. Li, T. Chen, and X. Gao, "Pr ep rin ot pe er re v iew Pr t n ot pe er v ed," 2015.
- [31] M. Ben *et al.*, "Impact of nutrients supply and pH changes on the elimination of hydrogen sulfide , dimethyl disulfide and ethanethiol by biofiltration," *Chem. Eng. J.*, vol. 258, pp. 420–426, 2014, doi: 10.1016/j.cej.2014.07.085.
- [32] S. Lin *et al.*, "applied sciences Exploring the Effect of Moisture on CO<sub>2</sub> Diffusion and Particle Cementation in Carbonated Steel Slag," 2024.
- [33] M. Quaghebeur, P. Nielsen, L. Horckmans, D. Van Mechelen, and P. Nielsen, "Accelerated Carbonation of Steel Slag Compacts: Development of High-Strength Construction Materials," vol. 3, no. December, 2015, doi: 10.3389/fenrg.2015.00052.
- [34] D. R. De Lacq, P. L. Llewellyn, R. Sustainability, L. Fernando, and M. Franco, "F UNDAMENTAL OF CO<sub>2</sub> A DSORPTION AND D IFFUSION IN," pp. 1–23, 2025.
- [35] B. Petrovic, M. Gorbounov, and S. M. Soltani, "Carbon Capture Science & Technology Impact of Surface Functional Groups and Their Introduction Methods on the Mechanisms of CO<sub>2</sub> Adsorption on Porous Carbonaceous Adsorbents," *Carbon Capture Sci. Technol.*, vol. 3, no. March, p. 100045, 2022, doi: 10.1016/j.ccst.2022.100045.
- [36] M. E. Leonard, "E NGINEERING G AS D IFFUSION E LECTRODES FOR," 2021.
- [37] J. Carlos, R. Allam, U. Kingdom, K. S. Lackner, and U. States, "Mineral carbonation and industrial uses of carbon



dioxide”.

- [38] H. Herzog, “Carbon Sequestration via Mineral Carbonation : Overview and Assessment Howard Herzog,” no. March, 2002.
- [39] V. Romanov, Y. Soong, C. Carney, G. Rush, B. Nielsen, and W. O. Connor, “Mineralization of Carbon Dioxide : Literature Review,” pp. 1–53.
- [40] Y. Luoyang, H. Wang, J. Li, B. Chen, X. Li, and Z. Guotao, “Mechanism of one - step hydrothermal nitric acid treatment for producing high adsorption capacity porous materials from coal gasification fine slag,” *Sci. Rep.*, no. 0123456789, pp. 1–17, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-72114-7.
- [41] Q. Zhao, C. Liu, X. Mei, H. Saxén, and R. Zevenhoven, “This is an electronic reprint of the original article . This reprint may differ from the original in pagination and typographic detail . Research progress of steel slag-based carbon sequestration Please cite the original version : Research progress of steel slag-based carbon sequestration,” *Fundam. Res.*, vol. 5, no. 1, pp. 282–287, 2025, doi: 10.1016/j.fmre.2022.09.023.
- [42] M. C. Bignozzi, A. Allegri, and A. D. Pozzo, “Carbonated Industrial Waste by CO2 mineralization as New Constituent for Cements,” pp. 2–5, 2025.
- [43] U. Rukiah, A. Abd, and F. Mohd, “Journal of Materials and Temperature-Driven Carbonation of Steel Slag for Carbon Capture and Storage ( CCS ) Applications,” vol. 04, pp. 56–62, 2026, doi: 10.61552/JME.2026.01.006.