

Pengaruh Partisi Antar Layer Butiran Terhadap Gas CO₂ Pada Batuan *Slag* Nikel

Amanda Setiawan, & 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: amandasetiawan001@gmail.com, Corresponding author: dan.mugisidi@uhamka.ac.id

Abstrak

Penyerapan gas CO₂ oleh material padat merupakan pendekatan penting dalam pengembangan teknologi Carbon Capture and Storage (CCS). *Slag* nikel sebagai limbah padat peleburan nikel berpotensi dimanfaatkan sebagai material penyerap karbon sekaligus bahan konstruksi. Kajian ini menganalisis pengaruh partisi antar lapisan butiran dalam *slag* nikel terhadap penyerapan CO₂ serta implikasinya terhadap pemanfaatan *slag*. Metode yang digunakan berupa tinjauan literatur terhadap artikel jurnal dan prosiding yang membahas sifat fisikokimia *slag* nikel, jenis partisi, jalur difusi, dan kinerja karbonasi. Hasil kajian menunjukkan bahwa keberadaan partisi padat-padat, padat-cair, pori/retakan, dan partisi kimia memperluas luas permukaan spesifik, menyediakan situs aktif reaksi, dan membentuk jalur difusi yang efektif sehingga meningkatkan kapasitas dan laju penyerapan CO₂. Rekayasa morfologi partisi melalui aktivasi mekanokimia atau perlakuan kimia menjadi strategi penting untuk mengoptimalkan fungsi *slag* nikel dalam mendukung penerapan CCS dan ekonomi sirkular industri.

Kata Kunci: Layer butiran, *slag* nikel, penyerapan gas CO₂.

Abstract

The absorption of CO₂ gas by solid materials is an important approach in the development of Carbon Capture and Storage (CCS) technology. Nickel slag, as a solid waste product of nickel smelting, has the potential to be used as a carbon absorbent material as well as a construction material. This study analyzes the effect of inter-particle layer partitions in nickel slag on CO₂ absorption and its implications for slag utilization. The method used is a literature review of journal articles and proceedings discussing the physicochemical properties of nickel slag, types of partitions, diffusion pathways, and carbonation performance. The results of the study show that the presence of solid-solid, solid-liquid, pore/crack, and chemical partitions expands the specific surface area, provides active reaction sites, and forms effective diffusion pathways, thereby increasing the capacity and rate of CO₂ absorption. Engineering the morphology of partitions through mechanochemical activation or chemical treatment is an important strategy for optimizing the function of nickel slag in supporting the application of CCS and the circular economy of industry.

Keywords: Grain layers, nickel slag, CO₂ absorption.

1 PENDAHULUAN

Industri pengolahan nikel, khususnya dari bijih laterit, telah mengalami peningkatan pesat dalam dua dekade terakhir seiring meningkatnya permintaan global terhadap logam nikel untuk industri baja tahan karat (*stainless steel*), baterai kendaraan listrik, serta teknologi energi bersih. Namun, di balik kontribusinya terhadap sektor industri, proses ekstraksi dan peleburan nikel menghasilkan limbah padat dalam jumlah besar berupa *slag* nikel. Setiap ton nikel yang diproduksi dapat menghasilkan hingga 2–3 ton *slag*, yang sebagian besar masih belum dimanfaatkan secara optimal [1]. Penumpukan *slag*

ini tidak hanya membutuhkan lahan yang luas untuk penimbunan, tetapi juga berpotensi menimbulkan dampak lingkungan seperti pencemaran logam berat, perubahan pH tanah, dan gangguan terhadap ekosistem sekitar lokasi industri [2]. Oleh karena itu, pemanfaatan *slag* nikel sebagai material sekunder dalam berbagai bidang menjadi topik penting dalam upaya menuju industri berkelanjutan (*sustainable industry*).

Secara umum, *slag* nikel dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis berdasarkan proses pembentukannya dan komposisi kimianya. Berdasarkan proses metalurginya, *slag* nikel terbagi menjadi *slag* feronikel dan *slag* pig iron nikel, di

mana keduanya memiliki kandungan oksida logam yang tinggi, terutama SiO_2 , FeO , MgO , dan CaO [3]. Sementara itu, berdasarkan kondisi pendinginan, *slag* dapat dibedakan menjadi *air-quenched slag* dan *slow-cooled slag*, yang memiliki perbedaan signifikan dalam struktur mineral dan ukuran butiran [4]. *Slag* yang didinginkan cepat umumnya berbentuk amorf dengan luas permukaan lebih tinggi, sedangkan pendinginan lambat menghasilkan kristal silikat yang lebih besar dan padat. Variasi ini memengaruhi karakteristik fisik, reaktivitas kimia, serta kesesuaian *slag* untuk berbagai aplikasi.

Dalam konteks pemanfaatan, *slag* nikel telah diteliti secara luas untuk berbagai fungsi teknik dan lingkungan. Salah satu bidang pemanfaatan yang paling banyak dikaji adalah penggunaannya sebagai bahan pengganti agregat dalam campuran beton dan aspal. [5], penambahan *slag* nikel hingga 30% dalam campuran beton meningkatkan kuat tekan hingga 33,79% dibandingkan beton normal, berkat struktur mineralnya yang keras dan tahan aus. Juga menunjukkan bahwa *slag* nikel dapat menggantikan hingga 70% agregat kasar dalam campuran perkerasan jalan tanpa mengurangi stabilitas marshall, sehingga berpotensi menggantikan agregat alam yang semakin terbatas [6]. Selain itu, *slag* nikel juga dimanfaatkan sebagai bahan stabilisasi tanah dan amelioran pada lahan terdegradasi. Penambahan *slag* nikel bersama zat humik mampu meningkatkan pH tanah dan ketersediaan unsur hara, sehingga mendukung produktivitas lahan marginal [7].

Selain di bidang konstruksi, *slag* nikel juga memiliki potensi tinggi untuk pemulihan logam dan aplikasi kimia. [8] menunjukkan bahwa *slag* nikel masih mengandung besi (Fe) dalam kadar tinggi yang dapat diekstraksi menggunakan metode *leaching* atau reduksi aluminotermik, menghasilkan *secondary metal recovery* yang bernilai ekonomi. *Slag* nikel tidak hanya dapat dimanfaatkan sebagai material konstruksi, tetapi juga sebagai sumber sekunder logam dan bahan baku dalam proses metalurgi lanjutan.

Untuk mengoptimalkan pemanfaatan tersebut, konsep partisi atau pemisahan (*partitioning*) sangat penting diterapkan dalam pengelolaan *slag*, baik dalam skala laboratorium maupun industri. Partisi dalam konteks ini mencakup pengelompokan *slag* berdasarkan ukuran butiran, fase mineral, atau kandungan kimianya agar dapat dimanfaatkan secara lebih efisien sesuai dengan karakteristiknya [9]. Misalnya, *slag* dengan ukuran butiran halus (*fine fraction*) lebih sesuai untuk substitusi semen atau *filler*, sedangkan butiran kasar (*coarse fraction*) dapat digunakan sebagai agregat pada beton atau aspal. Pendekatan partisi ini juga memungkinkan

optimalisasi proses pemrosesan lanjutan seperti pendinginan terkendali, pengayakan, atau pemisahan magnetik [10]. Penerapan metode partisi yang tepat dalam sistem material padat dapat meningkatkan efisiensi pengolahan hingga 40% dan mengurangi limbah residu yang tidak termanfaatkan.

Fungsi utama dari partisi *slag* meliputi peningkatan homogenitas material, peningkatan kualitas produk akhir, dan efisiensi proses pemanfaatan. Secara praktis, partisi dapat mengurangi variasi sifat fisik dan kimia antar kelompok material, sehingga memungkinkan aplikasi yang lebih terkontrol. Sebagai contoh, dalam pemanfaatan *slag* nikel sebagai bahan beton, partisi berdasarkan ukuran butiran terbukti memengaruhi kuat tekan dan ketahanan beton terhadap serangan sulfat [11]. Partisi kimia (*chemical partitioning*) membantu memisahkan fraksi logam yang masih tinggi untuk direduksi kembali, sementara fraksi inert dapat langsung dimanfaatkan dalam konstruksi.

Pengaruh penerapan konsep partisi terhadap efisiensi pemanfaatan *slag* nikel sangat signifikan. Dengan pemisahan yang tepat, kualitas material yang dihasilkan menjadi lebih seragam, biaya pengolahan dapat ditekan, serta dampak lingkungan akibat sisa limbah berkurang. Sebaliknya, jika proses partisi tidak diterapkan, *slag* yang digunakan secara acak dapat menyebabkan ketidakkonsistenan sifat mekanik, rendahnya durabilitas material, atau bahkan potensi pelepasan unsur berbahaya ke lingkungan [12]. Oleh karena itu, pemahaman mendalam tentang jenis-jenis *slag*, prinsip partisi, serta fungsi dan pengaruhnya sangat penting untuk mewujudkan sistem pengelolaan *slag* nikel yang efisien, aman, dan berkelanjutan.

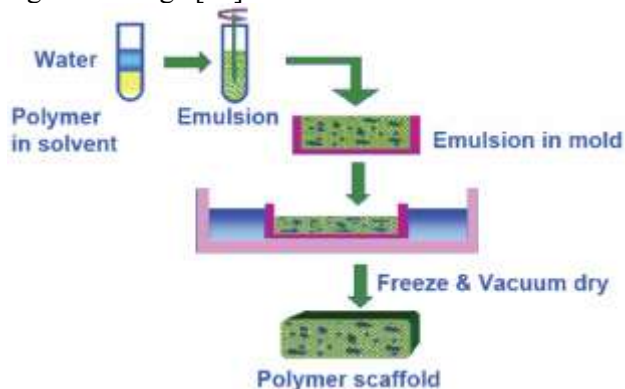
Berdasarkan latar belakang tersebut, kajian ini difokuskan pada analisis jenis-jenis partisi *slag* nikel, fungsi partisi dalam proses pemanfaatannya, serta bagaimana penerapan konsep tersebut memengaruhi performa material dan dampak lingkungannya.. Melalui pendekatan ini dapat diperoleh dasar ilmiah yang kuat untuk mendukung pengembangan teknologi pemanfaatan *slag* nikel yang bernilai tambah dan ramah lingkungan dalam konteks ekonomi sirkular industri logam.

2 Jenis-Jenis Partisi dalam *Slag* Nikel

Struktur mikro *slag* nikel merupakan hasil dari proses metalurgi yang kompleks, melibatkan pendinginan tidak seragam, perbedaan komposisi oksida, serta kristalisasi bertahap dari fasa cair. Akibatnya, terbentuk berbagai jenis partisi (*phase partition*) yang memiliki peran penting dalam menentukan sifat fisik, kimia, dan reaktivitas *slag*.

Empat partisi utama yang umum ditemukan adalah partisi fasa padat-padat, partisi fasa padat-cair, partisi pori atau retakan (*interlayer*), serta partisi kimia [13].

Keempat partisi ini tidak hanya menentukan perilaku mikrostruktur *slag* nikel, tetapi juga sangat berpengaruh terhadap kemampuan pemanfaatannya, misalnya dalam karbonasi mineral CO₂, bahan konstruksi, adsorben logam berat, atau pemulihan logam berharga [14].



Gambar 1 Skema Tipe Partisi [14]

2.1 Partisi Fasa Padat–Padat

Partisi fasa padat-padat terbentuk ketika dua atau lebih fasa kristal berbeda (misalnya MgO, SiO₂, Fe₂O₃, dan CaO) mengendap secara bersamaan selama proses pendinginan *slag*. Dalam *slag* nikel, fasa yang umum terbentuk antara lain olivin ((Mg,Fe)₂SiO₄), fayalit (Fe₂SiO₄), magnetit (Fe₃O₄), dan residu silika amorf [15].

Keberadaan partisi ini menciptakan batas antarfasa (*grain boundaries*) yang menjadi lokasi potensial aktivitas kimia karena di daerah tersebut terjadi ketidakseimbangan energi dan ketegangan kristal. Zona antarfasa ini dapat mempercepat reaksi karbonasi mineral atau hidrasi semen jika *slag* digunakan sebagai bahan tambahan pozzolan. Fasa padat-padat dengan distribusi olivin yang seimbang meningkatkan stabilitas termal dan mekanik, sehingga *slag* dapat dimanfaatkan sebagai material agregat dan pengisi beton yang tahan terhadap suhu tinggi dan lingkungan korosif [16].

Perlakuan oksidasi *slag* nikel menyebabkan perubahan struktur fasa padat dari Fe₂SiO₄ menjadi Fe₃O₄ dan Fe₂O₃, menghasilkan peningkatan jumlah batas fasa dan porositas internal, yang mempercepat difusi gas CO₂ dalam reaksi karbonasi. Fenomena ini menunjukkan bahwa partisi padat-padat tidak hanya bersifat pasif, tetapi juga aktif dalam meningkatkan reaktivitas kimia dan penyerapan karbon [17].

2.2 Partisi Fasa Padat–Cair

Jenis partisi ini muncul akibat proses pendinginan yang tidak seragam setelah peleburan,

menghasilkan zona batas antara fasa kristalin dan amorf. Daerah transisi ini memiliki aktivitas kimia tinggi karena mengandung oksida logam dengan tingkat ketidakseimbangan struktur atom [22].

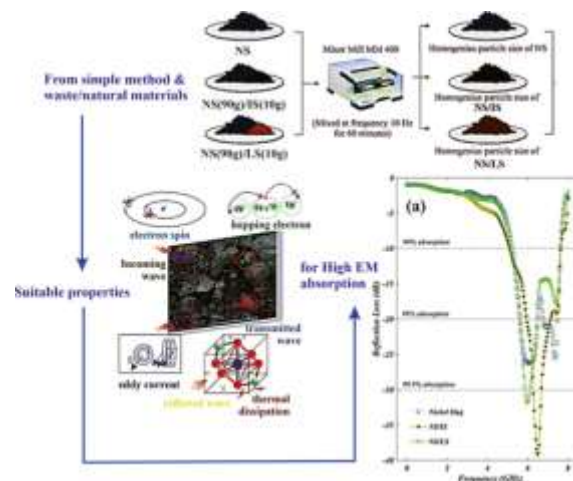
Pada kondisi ini, partisi padat-cair berperan penting dalam memfasilitasi reaksi kimia pada permukaan, terutama pada suhu tinggi. Dalam aplikasi konstruksi, fasa amorf yang terbentuk di sekitar partisi padat-cair dapat meningkatkan sifat adhesif *slag* terhadap bahan pengikat seperti semen portland [23].

2.3 Partisi Pori atau Retakan (*Interlayer*)

Partisi pori atau retakan terbentuk antar butiran akibat perbedaan laju pendinginan atau tegangan termal selama solidifikasi. Ruang antar butiran ini meningkatkan porositas total dan memperluas luas permukaan spesifik *slag* [24]. Porositas tinggi meningkatkan difusi gas CO₂ ke dalam matriks *slag*, mempercepat pembentukan lapisan karbonat pada permukaan. Hal ini menjadikan *slag* nikel sangat potensial untuk aplikasi penyerapan karbon dan bahan adsorben limbah cair.

2.4 Partisi Kimia

Partisi kimia terjadi akibat distribusi ion logam (Ni, Fe, Mg, Ca) yang tidak homogen dalam matriks *slag*. Fenomena ini menyebabkan terbentuknya zona dengan sifat kimia berbeda, yang dapat memengaruhi kinetika reaksi [25]. heterogenitas kimia ini menciptakan perbedaan potensial elektrostatik lokal yang mempercepat adsorpsi molekul CO₂. Dalam bidang material konstruksi, variasi kimia lokal dapat meningkatkan sifat pengikatan dan kemampuan pozzolan pada campuran slag-semen.



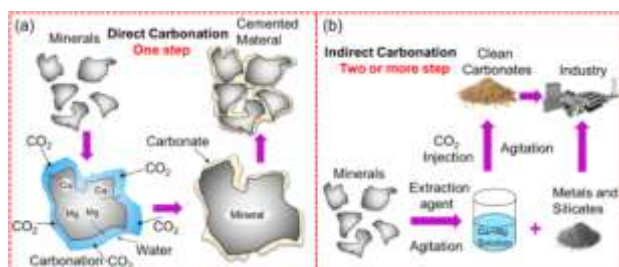
Gambar 2 morfologi antar jenis partisi dalam material slag nikel [23]

3 Fungsi dan Peran Partisi

Struktur partisi dalam *slag* nikel merupakan elemen mikrostruktural kritis yang menentukan karakteristik fisikokimia material serta efektivitasnya dalam proses karbonasi mineral. Partisi yang terbentuk sebagai konsekuensi dari heterogenitas komposisi dan distribusi fasa selama proses solidifikasi *slag*, menciptakan *interface* dan zona transisi dengan peran strategis dalam mengontrol fenomena transport massa, stabilitas mekanik, dan reaktivitas kimia. Pemahaman komprehensif terhadap fungsi dan peran partisi menjadi landasan fundamental dalam merancang strategi optimasi karbonasi slag nikel untuk aplikasi teknologi *Carbon Capture, Utilization and Storage* (CCUS).

3.1 Mengatur Jalur Difusi Gas atau Cairan

Struktur partisi dalam *slag* nikel berperan sebagai pengendali utama jalur difusi gas dan cairan yang membawa reaktan, seperti CO_2 dan air. Jalur difusi ini ditentukan oleh morfologi partisi, distribusi pori, dan keterhubungan antar fasa di dalam slag. Pada proses karbonasi mineral, difusi CO_2 menuju fasa reaktif (seperti MgO dan CaO) menjadi langkah pembatas laju reaksi (*rate limiting step*) setelah tahap pelarutan awal [26].



Gambar 1 Skema yang menunjukkan jalur difusi gas CO_2 melalui pori/retakan [26]

Partisi yang memiliki tortuositas rendah dan porositas terbuka memfasilitasi perpindahan CO_2 dan ion karbonat dalam fase cair menuju permukaan reaktif, meningkatkan efisiensi karbonasi. Sebaliknya, partisi yang menutup pori akibat presipitasi karbonat (CaCO_3 , MgCO_3) dapat membentuk *diffusion barrier*, menghambat akses CO_2 lebih lanjut ke bagian dalam partikel [27].

Dari sisi manfaat, pengendalian partisi memungkinkan peningkatan kapasitas penyerapan CO_2 hingga 30–50% lebih tinggi dibanding *slag* tanpa perlakuan [28]. Secara industri, optimasi jalur difusi dilakukan melalui aktivasi mekanokimia (penggilingan halus) atau perendaman pra-karbonasi untuk membuka permukaan partisi dan meningkatkan aksesibilitas pori [29].

3.2 Menentukan Kekuatan dan Kerapatan Struktur Slag

Struktur partisi juga menentukan integritas mekanik dan kerapatan mikroskopis *slag*. Perbedaan fasa dalam partisi (mis. antara fasa olivin, forsterit, dan fayalit) akan memengaruhi gaya ikatan antar kristal dan kekompakan struktur. Fasa kristalin yang saling terikat kuat meningkatkan kekuatan tekan dan modulus elastisitas, sedangkan keberadaan pori besar atau retakan mikro menurunkan stabilitas mekanik [30].

Pada proses karbonasi, terjadi transformasi fasa yang menghasilkan peningkatan densitas akibat presipitasi karbonat di rongga antar partisi. Proses ini menutup pori-pori besar dan memperkuat struktur internal *slag*, menghasilkan stabilisasi volume dan peningkatan ketahanan terhadap pelapukan [31]. Karbonasi juga menurunkan kadar CaO bebas yang bersifat ekspansif, sehingga *slag* lebih aman digunakan sebagai material konstruksi sekunder seperti beton atau campuran agregat [32].

Manfaat dari sudut teknik adalah peningkatan daya tahan dan kepadatan struktural yang berujung pada pemanfaatan *slag* sebagai agregat ramah lingkungan, mengurangi ketergantungan pada material alam serta mendukung ekonomi sirkular industri nikel [33].

3.3 Menjadi Area Aktif Reaksi Kimia

Partisi yang kaya akan logam reaktif seperti Mg , Ca , atau Fe berfungsi sebagai pusat aktivitas kimia dalam reaksi karbonasi mineral. Permukaan partisi menjadi lokasi di mana proses pelarutan oksida logam dan presipitasi karbonat berlangsung secara simultan. Permukaan dengan komposisi oksida basa tinggi (MgO , CaO) menyediakan situs aktif untuk penyerapan CO_2 dan pembentukan karbonat padat seperti magnesit dan kalsit [34].

Selain itu, partisi juga berperan dalam pengaturan kinetika reaksi heterogen, di mana energi aktivasi dapat diturunkan jika partisi memiliki defek kristal atau amorfisme tinggi. Hal ini menjelaskan mengapa *slag* dengan struktur amorf cenderung lebih reaktif terhadap karbonasi dibandingkan *slag* dengan dominasi fasa kristalin [35].

Manfaat praktisnya adalah meningkatnya reaktivitas awal karbonasi dan konversi CO_2 karena permukaan partisi berfungsi sebagai *nucleation site* untuk pembentukan karbonat. Dalam beberapa penelitian, area aktif yang diperbesar mampu meningkatkan laju karbonasi hingga 2 kali lipat dibanding *slag* tanpa aktivasi [36].

4 Pengaruh Partisi terhadap Pemanfaatan Slag Nikel

Partisi dalam struktur *slag* nikel memiliki peran yang sangat penting terhadap efektivitas dan arah pemanfaatannya dalam berbagai aplikasi seperti karbonasi mineral, bahan konstruksi, serta adsorpsi dan katalisis. Keberadaan partisi, baik berupa batas antar fasa, pori mikro, maupun partisi kristal, secara langsung memengaruhi jalur difusi, luas permukaan reaktif, serta kerapatan struktur padat. Dalam konteks karbonasi mineral, misalnya, partisi menentukan seberapa efektif gas CO_2 dapat mengakses permukaan reaktif oksida-oksida basa seperti MgO dan CaO yang terkandung dalam *slag*. Struktur yang memiliki porositas tinggi dan distribusi fasa mikro yang luas memungkinkan difusi CO_2 lebih cepat ke dalam bagian dalam partikel, sehingga meningkatkan laju pembentukan karbonat dan memperbesar kapasitas penyerapan CO_2 per satuan massa *slag*. Proses karbonasi pada *slag* nikel dapat ditingkatkan hingga dua kali lipat dengan memperbesar luas permukaan reaktif melalui pembentukan partisi mikro selama *milling* ringan [37]. Hal ini diperkuat oleh penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa semakin tinggi tingkat partisi internal, semakin tinggi pula efisiensi karbonasi karena terbentuknya jalur difusi terbuka yang mempercepat penyerapan CO_2 hingga 48% dalam kondisi basah [38].

Keberadaan partisi juga berperan dalam menahan difusi gas setelah terbentuk lapisan karbonat di permukaan partikel. Pada tahap awal, partisi berfungsi mempercepat reaksi karena meningkatkan luas permukaan aktif, tetapi pada tahap lanjut dapat menghambat reaksi jika lapisan karbonat menutup jalur difusi. Studi yang dilakukan menunjukkan bahwa fenomena “*self-passivation*” ini sering terjadi pada *slag* dengan partisi mikro yang tidak saling terhubung [39]. Oleh karena itu, optimasi morfologi partisi menjadi aspek penting untuk menjaga keseimbangan antara reaktivitas awal dan keberlanjutan difusi. Proses *mild mechanical activation* dan *alkali treatment* direkomendasikan karena mampu membuka pori mikro tanpa merusak struktur utama *slag*, sebagaimana dibuktikan dengan menemukan peningkatan laju karbonasi hingga 2,5 kali lipat setelah aktivasi alkali pada *slag* kaya Mg [40].

Dalam aplikasi bahan konstruksi, partisi berpengaruh terhadap kekuatan tekan, kerapatan, dan durabilitas campuran semen-*slag*. *Ferronickel slag* yang memiliki partisi mikro halus dan homogen dapat meningkatkan *packing density* material, sehingga mengurangi porositas dan memperkuat ikatan antar partikel semen. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa substitusi semen dengan 20% *ferronickel slag* yang telah melalui proses karbonasi menghasilkan peningkatan kekuatan tekan hingga 12,4%

dibandingkan beton konvensional, akibat peningkatan distribusi partisi yang lebih merata [41]. Sebaliknya, *slag* yang masih memiliki partisi besar dan tidak aktif secara kimia hanya berfungsi sebagai pengisi (filler) dan tidak berkontribusi pada reaksi pozzolanik yang membentuk C–S–H gel [42]. *Carbonation* pada *slag* juga mengurangi kandungan *free*- CaO yang dapat menyebabkan ekspansi dan retak, sehingga meningkatkan stabilitas jangka panjang struktur beton [43].

Selain itu, adanya partisi antar fasa $\text{SiO}_2\text{--Fe}_2\text{O}_3\text{--MgO}$ dalam *slag* karbonasi menghasilkan permukaan kompleks yang meningkatkan interaksi antara semen dan agregat, sebagaimana dilaporkan kedalam *Construction and Building Materials*, di mana *slag* dengan mikrostruktur berpartisi halus memperlihatkan ketahanan terhadap penetrasi ion klorida hingga 35% lebih baik daripada beton tanpa perlakuan [44]. Dalam *Cement and Concrete Composites* juga menegaskan bahwa partisi amorf berperan sebagai inti pertumbuhan kristal C–S–H baru yang memperkuat ikatan internal [45]. Pengendalian partisi melalui proses pra-karbonasi dan penggilingan ringan menjadi faktor kunci dalam merancang material konstruksi ramah lingkungan berbasis *slag* nikel.



Gambar 4 Skema mekanisme karbonasi slag nikel dalam media penggilingan [45]

Dalam aplikasi adsorpsi dan katalisis, luas permukaan yang tinggi akibat partisi mikro dan meso memperbesar jumlah situs aktif untuk penyerapan ion logam berat atau molekul gas. *Slag* nikel yang dimodifikasi melalui perlakuan asam atau basa menghasilkan partisi terbuka dengan distribusi pori berukuran 5–50 nm, yang meningkatkan kapasitas adsorpsi secara signifikan. Kapasitas adsorpsi ion Pb^{2+} pada *slag* meningkat dari 18 mg/g menjadi 72 mg/g setelah pembentukan partisi mikro melalui aktivasi alkali [46]. Hal ini sejalan dengan hasil yang dilaporkan bahwa *slag* termodifikasi menunjukkan peningkatan efisiensi penyerapan Cr^{6+} hingga 93%, jauh lebih tinggi dibanding *slag* mentah yang hanya

mencapai 47% [47]. Mekanisme utama adsorpsi yang difasilitasi partisi meliputi pertukaran ion, pembentukan kompleks permukaan, dan presipitasi karbonat pada lokasi reaktif, di mana reaktivitas sangat dipengaruhi oleh distribusi partisi dan luas permukaan spesifik [35] [40].

Dalam bidang katalisis, partisi juga berfungsi sebagai penopang (*support*) bagi logam aktif seperti Ni, Co, atau Fe. Struktur berpartisi yang stabil dapat mencegah sintering partikel logam selama reaksi suhu tinggi. Kajian menunjukkan bahwa katalis Ni/*slag* yang dikalsinasi pada 600°C dengan partisi mikro homogen memiliki aktivitas 28% lebih tinggi untuk proses reforming metana dibanding katalis komersial berbasis alumina [46] [47]. Hasil serupa diperoleh bahwa keberadaan partisi mesopori memperpanjang umur katalis hingga 500 jam operasi tanpa kehilangan aktivitas signifikan [14]. Hal ini membuktikan bahwa pengendalian morfologi partisi tidak hanya bermanfaat untuk adsorpsi, tetapi juga menentukan stabilitas dan efisiensi katalitik dalam aplikasi energi terbarukan.

Dari perspektif lingkungan dan ekonomi, pengendalian partisi dalam *slag* nikel menawarkan keuntungan besar. Proses pembentukan partisi melalui pra-perlakuan ringan memerlukan energi lebih rendah dibanding penggilingan ekstrem, tetapi memberikan peningkatan signifikan dalam reaktivitas dan fungsi material. Selain itu, *slag* yang telah mengalami karbonasi dengan struktur berpartisi stabil menunjukkan penurunan risiko pelindian logam berat hingga 60% [46] [45].

Secara keseluruhan, partisi berperan ganda sebagai pengatur difusi, penguat struktur, dan penentu luas permukaan aktif dalam *slag* nikel. Dalam karbonasi mineral, partisi menentukan efektivitas penyerapan CO₂ melalui peningkatan aksesibilitas terhadap oksida basa; dalam bahan konstruksi, partisi berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan mekanik dan durabilitas; sementara dalam adsorpsi dan katalisis, partisi memperluas area aktif dan meningkatkan efisiensi proses. Dengan demikian, rekayasa partisi pada *slag* nikel bukan hanya aspek mikrostruktural, tetapi merupakan strategi fundamental untuk mengoptimalkan kinerja material dalam berbagai aplikasi teknologi hijau dan sirkular.

5 KESIMPULAN

Dari hasil pembahasan dapat disimpulkan bahwa struktur partisi antar lapisan butiran (*interlayer partition*) pada *slag* nikel berperan besar dalam menentukan sifat fisik, kimia, dan fungsi material tersebut, terutama dalam proses penyerapan gas CO₂

melalui mekanisme karbonasi mineral serta dalam penerapan di bidang konstruksi, adsorpsi, dan katalisis. Keberadaan partisi seperti pori-pori, retakan mikro, maupun batas fasa padat-padat dan padat-cair secara signifikan memperluas luas permukaan spesifik dan membuka jalur difusi gas ke bagian dalam matriks *slag*. Hal ini memungkinkan interaksi yang lebih optimal antara gas CO₂ dan oksida-oksida basa seperti MgO serta CaO, sehingga mempercepat pembentukan karbonat stabil seperti MgCO₃ dan CaCO₃. Akibatnya, *slag* nikel dengan struktur berpartisi mampu menunjukkan efisiensi penyerapan karbon yang lebih tinggi dibandingkan *slag* tanpa partisi.

Selain itu, partisi berfungsi sebagai pengatur utama jalur difusi dan kinetika reaksi karbonasi. Pada tahap awal, partisi mempercepat laju penyerapan CO₂ melalui peningkatan aksesibilitas terhadap permukaan aktif, namun pada tahap lanjut, lapisan karbonat yang terbentuk dapat menutup sebagian pori sehingga menyebabkan penurunan laju reaksi. Oleh karena itu, rekayasa morfologi partisi melalui proses aktivasi mekanokimia atau perlakuan alkali ringan menjadi strategi penting untuk menjaga keseimbangan antara reaktivitas awal dan keberlanjutan proses karbonasi. Keberadaan partisi juga memperkuat struktur mekanik *slag* dengan meningkatkan kepadatan, kekuatan tekan, dan ketahanan terhadap pelapukan. Proses karbonasi pada *slag* berpartisi mampu menurunkan kadar CaO bebas yang bersifat ekspansif, sehingga material menjadi lebih stabil dan aman digunakan sebagai agregat atau bahan substitusi semen dalam beton ramah lingkungan.

Struktur berpori yang dihasilkan oleh partisi turut meningkatkan kemampuan adsorpsi dan aktivitas katalitik *slag* nikel. Peningkatan luas permukaan dan jumlah situs aktif memungkinkan slag termodifikasi menyerap ion logam berat seperti Pb²⁺ dan Cr⁶⁺ secara lebih efisien, serta berfungsi sebagai penopang yang stabil bagi logam katalis seperti Ni, Fe, dan Co. Perlakuan kimia ringan yang membuka partisi mikro terbukti dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi hingga empat kali lipat dan memperpanjang umur katalis dalam proses reaksi suhu tinggi tanpa kehilangan aktivitas signifikan. Dari sisi lingkungan, optimalisasi partisi juga berkontribusi pada penurunan risiko pelindian logam berat hingga 60%, menjadikan *slag* nikel yang telah dikarbonasi lebih aman untuk aplikasi jangka panjang.

Secara keseluruhan, hasil kajian ini menunjukkan bahwa rekayasa dan pengendalian partisi antar butiran dalam *slag* nikel merupakan pendekatan strategis untuk meningkatkan nilai

tambah limbah industri menjadi material yang efisien, ekonomis, dan berkelanjutan. Partisi tidak hanya berperan dalam meningkatkan efisiensi penyerapan CO₂, tetapi juga memperkuat sifat mekanik dan memperluas potensi aplikasi *slag* dalam berbagai bidang teknologi hijau. Secara keseluruhan, optimasi struktur partisi pada *slag* nikel berpotensi besar mendukung penerapan teknologi *Carbon Capture and Storage* (CCS) dan pengurangan emisi karbon industri. Pendekatan ini juga sejalan dengan konsep ekonomi sirkular untuk mewujudkan sistem industri yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

KEPUSTAKAAN

- [1] A. Setyani, Y. Amalia, and H. R. Wardhana, "Potensi dan Karakterisasi Limbah Metalurgi 'Slag Nikel Pig Iron,'" *J. Metall. Eng. Process. Technol.*, vol. 3, no. 2, p. 132, 2023, doi: 10.31315/jmept.v3i2.8579.
- [2] S. Chelluri, N. Hossiney, S. Chandra, P. Bekoe, and M. Tia, "A Review of the Performance Properties of Geopolymer Pavement-Quality Concrete," *Constr. Mater.*, vol. 5, no. 3, pp. 1–32, 2025, doi: 10.3390/constrmater5030049.
- [3] A. C. Setyabrata, A. Maksum, A. B. Prasetyo, B. Priyono, and J. Wahyuadi Soedarsono, "Effect of Sodium Carbonate on the Reduction Process of Nickel Slag from Sulawesi," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 553, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/553/1/012028.
- [4] R. S. Edwin, E. Ngii, R. Talanipa, F. Masud, and R. Sriyani, "Effect of nickel slag as a sand replacement in strength and workability of concrete," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 615, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/615/1/012014.
- [5] X. Li, X. Zhang, X. Zang, and X. Xing, "Structure and phase changes of nickel slag in oxidation treatment," *Minerals*, vol. 10, no. 4, pp. 1–12, 2020, doi: 10.3390/min10040313.
- [6] S. Pelupessy, Z. Mufrodi, and T. E. Suharto, "Mechanical Characteristics of Concrete with Addition of Nickel Slag Waste as Aggregates," *Indones. J. Chem. Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 62–69, 2024, doi: 10.26555/ijce.v2i2.1102.
- [7] R. T. Bethary, D. E. Intari, and A. H. Mutaqin, "Utilization of Nickel Slag as an Aggregate Substitute in Asphalt Pavement Mixtures (AC-BC)," *Fondasi J. Tek. Sipil*, vol. 12, no. 2, p. 292, 2023, doi: 10.36055/fondasi.v12i2.21973.
- [8] F. Rosalina, D. Tjahyandari, and D. Darmawan, "The Potential Of Nickel Slag with Humic Substance Addition as Ameliorating Materials on Gajrug Red-Yellow Podzolic," *SAINS TANAH - J. Soil Sci. Agroclimatol.*, vol. 15, no. 1, p. 61, 2018, doi: 10.15608/stjssa.v15i1.17814.
- [9] M. Maryudi, S. D. A. Candra, M. Azhar, and A. Yahya, "Extraction Of Iron (Fe) as A Valuable Metal Content of Nickel Slag Waste," *Indones. J. Chem. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 80–85, 2023, doi: 10.26555/ijce.v1i2.658.
- [10] M. González-Locarno, Y. M. Pautt, A. Albis, E. F. López, and C. D. G. Tovar, "Assessment of chitosan-rue (*Ruta graveolens* L.) essential oil-based coatings on refrigerated cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) quality," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 8, 2020, doi: 10.3390/AP10082684.
- [11] K. Bru, A. Seron, A. Morillon, D. Algermissen, C. Lerouge, and N. Menad, "Characterization of a chromium-bearing carbon steel electric arc furnace slag after magnetic separation to determine the potential for iron and chromium recovery," *Minerals*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.3390/min12010047.
- [12] K. Yamini, L. Dyer, B. Lim, and R. D. Alorro, "Technospheric Mining of Cobalt and Nickel from Waste Nickel Furnace Slag by Ascorbic Acid-Assisted Citric Acid Leaching," *Recycling*, vol. 10, no. 2, 2025, doi: 10.3390/recycling10020043.
- [13] D. Attah-Kyei *et al.*, "A Crucial Step Toward Carbon Neutrality in Pyrometallurgical Reduction of Nickel Slag," *J. Sustain. Metall.*, vol. 9, no. 4, pp. 1759–1776, 2023, doi: 10.1007/s40831-023-00763-5.
- [14] E. Urtnasan, A. Kumar, and J. P. Wang, "Artificial Slags with Modulated Properties for Controlled Nickel Dissolution in Smelting Process," *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 77, no. 9, pp. 2293–2302, 2024, doi: 10.1007/s12666-024-03304-0.
- [15] W. J. Cho, M. J. Kim, and J. S. Kim, "Study on the pore structure characteristics of ferronickel-slag-mixed ternary-blended cement," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 21, pp. 1–12, 2020, doi: 10.3390/ma13214863.
- [16] L. M. Coelho, A. C. R. Guimarães, C. R. C. L. Alves Moreira, G. P. P. dos Santos, S. N. Monteiro, and P. H. P. M. da Silveira, "Feasibility of Using Ferronickel Slag as a Sustainable Alternative Aggregate in Hot Mix Asphalt," *Sustain.*, vol. 16, no. 19, pp. 1–17, 2024, doi: 10.3390/su16198642.
- [17] A. Arce, A. Komkova, J. Van De Sande, C. G. Papanicolaou, and T. C. Triantafyllou, "Optimal Design of Ferronickel Slag Alkali-Activated Material for High Thermal Load

- Applications Developed by Design of Experiment,” *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 13, 2022, doi: 10.3390/ma15134379.
- [18] A. G. Kasikov, E. A. Shchelokova, O. A. Timoshchik, and A. Y. Sokolov, “Utilization of Converter Slag from Nickel Production by Hydrometallurgical Method,” *Metals (Basel)*, vol. 12, no. 11, 2022, doi: 10.3390/met12111934.
- [19] Y. Wang, R. Zhu, Q. Chen, G. Wei, S. Hu, and Y. Guo, “Recovery of Fe, Ni, Co, and Cu from nickel converter slag through oxidation and reduction,” *ISIJ Int.*, vol. 58, no. 12, pp. 2191–2199, 2018, doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-533.
- [20] G. Zhang, N. Wang, M. Chen, and Y. Cheng, “Recycling nickel slag by aluminum dross: Iron-extraction and secondary slag stabilization,” *ISIJ Int.*, vol. 60, no. 3, pp. 602–609, 2020, doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2019-173.
- [21] B. Lim, H. S. Kim, and J. Park, “Implicit interpretation of indonesian export bans on lme nickel prices: Evidence from the announcement effect,” *Risks*, vol. 9, no. 5, pp. 1–7, 2021, doi: 10.3390/risks9050093.
- [22] B. Lim and R. D. Alorro, “Technospheric Mining of Mine Wastes: A Review of Applications and Challenges,” *Sustain. Chem.*, vol. 2, no. 4, pp. 686–706, 2021, doi: 10.3390/suschem2040038.
- [23] N. T. Arndt, L. Fontboté, J. W. Hedenquist, S. E. Kesler, J. F. H. Thompson, and D. G. Wood, “Future global mineral resources,” *Geochemical Perspect.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–184, 2017, doi: 10.7185/geochempersp.6.1.
- [24] T. Salmi, J. Wärnå, and P. Tolvanen, “Understanding of Solid-Fluid Kinetics and Mass Transfer: From Ideal to Non-ideal Models, From Perfect Spheres to Moon Landscape,” *Front. Chem. Eng.*, vol. 2, no. August, pp. 1–9, 2020, doi: 10.3389/fceng.2020.00006.
- [25] K. Hooshyari *et al.*, “High temperature membranes based on PBI/sulfonated polyimide and doped-perovskite nanoparticles for PEM fuel cells,” *J. Memb. Sci.*, vol. 612, p. 118436, 2020, doi: 10.1016/j.memsci.2020.118436.
- [26] S. Nadolski, M. Samuels, B. Klein, and C. J. R. Hart, “Evaluation of bulk and particle sensor-based sorting systems for the New Afton block caving operation,” *Miner. Eng.*, vol. 121, no. October 2017, pp. 169–179, 2018, doi: 10.1016/j.mineng.2018.02.004.
- [27] T. Li *et al.*, “Construction of Highly Conductive Cross-Linked Polybenzimidazole-Based Networks for High-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells,” *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 5, 2023, doi: 10.3390/ma16051932.
- [28] D. Wang *et al.*, “Ethyl phosphoric acid grafted amino-modified polybenzimidazole with improved long-term stability for high-temperature proton exchange membrane applications,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 4, pp. 3176–3185, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.11.219.
- [29] M. R. Berber and N. Nakashima, *Bipyridine-based polybenzimidazole membranes with outstanding hydrogen fuel cell performance at high temperature and non-humidifying conditions*, vol. 591. Elsevier B.V., 2019. doi: 10.1016/j.memsci.2019.117354.
- [30] N. V. Sarlis, E. S. Skordas, S. R. G. Christopoulos, and P. K. Varotsos, “Identifying the Occurrence Time of the Destructive Kahramanmaraş-Gazientep Earthquake of Magnitude M7.8 in Turkey on 6 February 2023 †,” *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 3, 2024, doi: 10.3390/app14031215.
- [31] X. Li *et al.*, “Highly Conductive and Mechanically Stable Imidazole-Rich Cross-Linked Networks for High-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells,” *Chem. Mater.*, vol. 32, no. 3, pp. 1182–1191, 2020, doi: 10.1021/acs.chemmater.9b04321.
- [32] M. Hu, T. Li, S. Neelakandan, L. Wang, and Y. Chen, “Cross-linked polybenzimidazoles containing hyperbranched cross-linkers and quaternary ammoniums as high-temperature proton exchange membranes: Enhanced stability and conductivity,” *J. Memb. Sci.*, vol. 593, no. August 2019, p. 117435, 2020, doi: 10.1016/j.memsci.2019.117435.
- [33] F. Liu *et al.*, “Cross-Linkable Polymeric Ionic Liquid Improve Phosphoric Acid Retention and Long-Term Conductivity Stability in Polybenzimidazole Based PEMs,” *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 6, no. 12, pp. 16352–16362, 2018, doi: 10.1021/acssuschemeng.8b03419.
- [34] F. Abdul *et al.*, “Application of iron-rich slag to capture carbon dioxide gas through direct gas-solid carbonation,” *Glob. J. Environ. Sci. Manag.*, vol. 10, no. 4, pp. 1675–1686, 2024, doi: 10.22034/gjesm.2024.04.11.
- [35] Z. Tang, H. Peng, P. Mei, F. Huang, S. Yi, and F. Feng, “Performance Analysis of Ferronickel Slag-Ordinary Portland Cement Pervious

- Concrete,” *Materials (Basel)*., vol. 17, no. 7, 2024, doi: 10.3390/ma17071628.
- [36] E. Soldado, A. Antunes, H. Costa, R. Do Carmo, and E. Júlio, “Influence of pozzolan, slag and recycled aggregates on the mechanical and durability properties of low cement concrete,” *Materials (Basel)*., vol. 14, no. 15, 2021, doi: 10.3390/ma14154173.
- [37] D. Rezakhani, A. H. Jafari, and M. Hajabassi, “Durability, mechanical properties and rebar corrosion of slag-based cement concrete modified with graphene oxide,” *Structures*, vol. 49, no. January, pp. 678–697, 2023, doi: 10.1016/j.istruc.2023.01.149.
- [38] Ravindranatha, A. Shenoy, and Sidharth, “Exploring Flexural Strength in High-Performance Concrete with Iron Slag and Copper Slag as Sand Substitutes,” *Eng. Proc.*, vol. 59, no. 1, 2023, doi: 10.3390/engproc2023059242.
- [39] S. M. Abdelbasir and M. A. A. Khalek, “From waste to waste: iron blast furnace slag for heavy metal ions removal from aqueous system,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, no. 38, pp. 57964–57979, 2022, doi: 10.1007/s11356-022-19834-3.
- [40] L. Yang, X. Qian, Z. Wang, Y. Li, H. Bai, and H. Li, “Steel slag as low-cost adsorbent for the removal of phenanthrene and naphthalene,” *Adsorpt. Sci. Technol.*, vol. 36, no. 3–4, pp. 1160–1177, 2018, doi: 10.1177/0263617418756407.
- [41] J. Yang *et al.*, “Research Progress and Hotspots of Steel Slag Application in Road Construction: A Bibliometric Perspective,” *Infrastructures*, vol. 10, no. 3, pp. 1–30, 2025, doi: 10.3390/infrastructures10030054.
- [42] Z. Zhang, L. Liu, B. Shen, and C. Wu, “Preparation, modification and development of Ni-based catalysts for catalytic reforming of tar produced from biomass gasification,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 94, pp. 1086–1109, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.07.010.
- [43] H. O. Seo, “Recent scientific progress on developing supported Ni catalysts for dry (CO₂) reforming of methane,” *Catalysts*, vol. 8, no. 3, pp. 16–22, 2018, doi: 10.3390/catal8030110.
- [44] H. Radfarnia *et al.*, “Experimental Study on Indirect CO₂ 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.
- [45] P. P. Plehiers *et al.*, “Artificial Intelligence for Computer-Aided Synthesis In Flow: Analysis and Selection of Reaction Components,” *Front. Chem. Eng.*, vol. 2, no. August, 2020, doi: 10.3389/fceng.2020.00005.
- [46] L. Guo, X. Peng, Q. Wang, Y. Zhao, L. Xu, and S. Wu, “Research progress on carbon dioxide mineralization sequestration technology by tailings,” *Green Smart Min. Eng.*, vol. 1, no. 3, pp. 307–321, 2024, doi: 10.1016/j.gsme.2024.08.005.
- [47] W. J. J. Huijgen, G. J. Witkamp, and R. N. J. Comans, “Mineral CO₂ sequestration by steel slag carbonation,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 39, no. 24, pp. 9676–9682, 2005, doi: 10.1021/es050795f.