

TERAK NON-BESI SEBAGAI BAHAN TAMBAH SEMEN PORTLAND PADA BETON STRUKTURAL

*Sandy I. Yansiku¹, Yohanes G. G. L. Duran²

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Nusa Nipa Indonesia, Jln. Kesehatan No.3, Maumere, 86111, Indonesia

^{*)} Email: sandyansiku@gmail.com

ABSTRACT

The degradation in environmental grade and generating concrete with low level of ordinary Portland cement have emerged intention for researchers to produce concrete with slag-based substitutional material. The utilization of slag as a partial substitution of cementitious material in concrete has encountered the need of more sustainable materials in the concrete technology. In contrast, the application of non-ferrous slag (NFS) as substitution of the ordinary Portland cement is not well focused despite the largely global slag deposit and the application in concrete technology. Worldwidel immense deposit of various non-ferrous slag from mining and manufacturing process can be used in generating high performance concrete. On that account, this paper provides a critical review of recent studies concerning the non-ferrous based slag as the substitution of regular Portland cement. Production techniques, properties and the applications of non-ferrous slag for high strength concrete are also examined. Cement with nickel and copper slag addition with high silica content has the potential to increase concrete durability with proper curing method due to better hydration process and low porosity. The maximum 15% non-ferrous slag addition in total cement weight at high water cement ratio increases concrete compressive strength by up to 30%. Substitution of non-ferrous slag for the ordinary Portland cement in concrete has great potential to overcome stock waste issues, to reduce carbon dioxide emission and consequently reduce global energy consumption as an environmentally friendly approach.

Keywords: Sustainable, non-ferrous slag, waste, concrete, substitutions, strength.

ABSTRAK

Penurunan kualitas lingkungan dan minimalisasi produksi semen telah memunculkan ide untuk penelitian pembuatan beton dengan bahan substitusi menggunakan terak. Pemanfaatan terak sebagai bahan tambahan pada semen dalam beton telah meningkat tajam dan telah menemukan teknologi terbaru dalam dekade terakhir untuk menjawab kebutuhan material ramah lingkungan/green material. Sebaliknya, penerapan terak non-besi/non-ferrous slag (NFS) sebagai pengganti sebagian komponen semen dalam beton belum berkembang dengan baik meskipun stok terak ini berada dalam jumlah besar disertai dengan kemungkinannya untuk dicampur dalam beton. Stok bahan limbah yang sangat besar di seluruh dunia seperti terak non-besi dari pertambangan dan manufaktur dalam bentuk tembaga, nikel, seng, timah dan fosfor dapat dimanfaatkan dalam memproduksi beton mutu tinggi. Oleh karena itu, artikel ini menyajikan tinjauan kritis terhadap studi dan pengembangan terak non-besi sebagai pengganti semen dalam beton. Metode pemrosesan, sifat fisik dan mekanis NFS dan penerapannya untuk mendapatkan beton mutu tinggi juga dibahas dalam makalah ini. Tinjauan ini menemukan bahwa beton dengan terak dapat mengurangi hingga separuh emisi CO₂ dan menghemat energi sampai dengan 40%. Semen dengan tambahan terak nikel dan tembaga dengan kandungan silika tinggi berpotensi mempertinggi ketahanan beton dengan metode curing yang tepat akibat proses hidrasi yang lebih baik dan porositas rendah. Rasio penambahan optimal sebesar 15% dari berat semen pada faktor air semen tinggi meningkatkan kuat tekan beton hingga 30%. Substitusi terak non-besi pada porsi berat semen dalam beton sangat berpotensi mengatasi masalah penumpukan limbah, mengurangi emisi karbondioksida sehingga mengurangi konsumsi energi global sebagai suatu pendekatan yang ramah lingkungan.

Kata kunci: Berkelanjutan, terak non-besi, limbah, beton, substitusi, kekuatan.

1. PENDAHULUAN

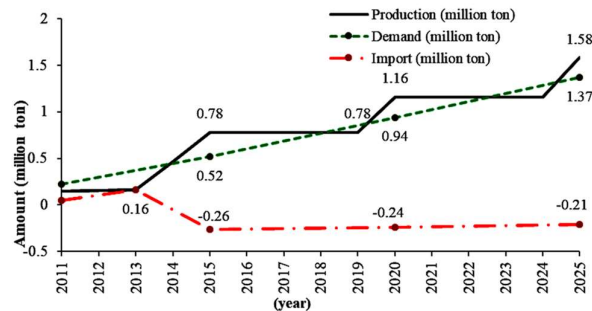
Badan pemerintah di sebagian besar negara yang berurusan dengan lingkungan secara intensif melakukan pengawasan ketat terhadap produksi semen. Dampak pemanfaatan semen dalam produksi dan aplikasi terhadap keberlanjutan lingkungan baru-baru ini ditetapkan sebagai masalah serius karena emisi karbondioksida yang berbahaya sekitar 0,7 kg per kg semen Portland [1]. Pendekatan yang lebih ramah lingkungan secara teknis dipromosikan untuk mengatasi masalah tersebut. Berbagai teknik untuk mengganti semen menunjukkan kinerja yang tidak memuaskan dalam produksi beton karena ikatan permukaan yang buruk antara semen dan penggantinya [2], [3], [4], [5], [6], [7]. Bubuk kaca, ban karet bekas [2] dari kendaraan bermotor dan agregat lainnya untuk menggantikan sebagian bahan beton konvensional telah dianalisis. Campuran beton ini melibatkan material semen alternatif/*supplementary cementitious material* (SCM), yang merupakan produk sampingan dari proses tertentu, selain komposisi semen dalam mortar. Jenis umum SCM adalah terak besi [5], [8], [9], [10], [11], terak/*slag* tembaga, abu terbang [5], [8], [9] dan metakaolin. Investigasi telah dilakukan untuk mengamati penggunaan SCM, tetapi masih sangat terbatas studi yang meneliti penggunaan terak *non-ferrous* (NFS) [12], [13]. Industri logam non-besi terus berkontribusi terhadap penurunan dan penggunaan kembali limbah berbahaya. Pemanfaatan terak menguntungkan bagi teknologi beton karena proses terak membutuhkan lebih sedikit energi dan bahan baku dalam siklus produksi beton sementara kualitas beton mungkin dapat ditingkatkan. Pemanfaatan kandungan terak yang

tepat dalam komposisi beton juga dapat melindungi beton terhadap korosi. Selain manfaat ini, beton berbasis terak memiliki kelemahan seperti tingkat hidrasi yang relatif lebih rendah daripada beton konvensional yang mengekspresikan proses karbonat saat terkena udara pada usia awal beton. Namun, kekurangan dan penyimpangan dalam praktik sering diabaikan sebagai perbedaan yang tidak signifikan. Penggunaan terak besi sebagai SCM merupakan praktik umum dalam produksi beton. Di sisi lain, menggabungkan NFS dalam beton tidak diizinkan dalam standar internasional karena stok NFS yang besar dan dampaknya yang merusak lingkungan. Namun, jenis terak ini memiliki sifat seperti semen yang mungkin meningkatkan kekuatan akhir dan kemampuan kerja beton. Penggunaan terak sebagai SCM dapat mengurangi aplikasi semen Portland sebagai pendekatan yang ramah lingkungan [14], [15]. Dalam penelitian ini, metode yang digunakan adalah studi literatur pada berbagai sumber yang relevan tentang terak non-besi dan kontribusinya terhadap kekuatan beton serta dampaknya terhadap lingkungan.

2. TERAK SEBAGAI BAHAN TAMBAH PADA MATERIAL SEMEN

Terak/slag

Terak merupakan limbah yang diolah dari kegiatan penambangan dan sebagai residu dari proses ekstraksi dan pemurnian material di pabrik pertambangan. Terak didominasi oleh silikat dan oksida yang berasal dari peleburan bijih logam yang kemudian didinginkan untuk dapat digunakan. Terak memiliki banyak kegunaan dalam hal pengendalian suhu selama peleburan dan meminimalkan produk cair akhir sebelum logam cair dipindahkan dari tungku. Terak juga digunakan dalam industri beton [4]. World Economy Outlook melaporkan bahwa pada tahun 2024 produksi nikel dan tembaga dunia masing-masing sebesar 3.7 juta ton dan 26 juta ton [16] sedangkan estimasi potensi mineral bijih nikel di Indonesia sebesar 1,5 miliar ton dan bijih tembaga sebesar 23,8 miliar ton [17]. Jumlah produksi dan permintaan tembaga di Indonesia disajikan pada Gambar 1. Terlihat bahwa potensi produksi produk sampingan berbasis NFS di pabrik-pabrik seperti nikel dan tembaga di Indonesia akan terus meningkat hingga tahun 2025. Stok produk sampingan terak dalam jumlah besar telah memperlihatkan dampaknya terhadap lingkungan.

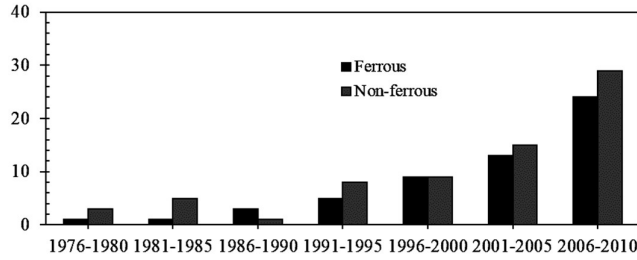


Gambar 1. Estimasi pasokan-permintaan-impor produksi tembaga Indonesia

Kehadiran seng dan tembaga setelah tahap pencucian terak normal menawarkan target potensial ekstra untuk daur ulang terak. Produksi semen terak dimulai di Jerman pada tahun 1888. Antara tahun 1919 dan 1930 semen terak digunakan untuk membangun kanal Laut Utara di IJmuiden, Belanda dan penelitian menunjukkan ketahanannya yang menjanjikan terhadap air laut [8]. Produksi terak dan kemungkinan dampaknya terhadap lingkungan telah mendorong para peneliti untuk mengeksplorasi penggunaan terak secara teknis dan ramah lingkungan dalam proyek konstruksi [18], [19]. Sebagai bahan substitusi semen konvensional, terak dibagi menjadi terak besi/*ferrous* dan terak non-besi/*non-ferrous*. Penelitian tentang terak yang secara umum dimulai pada tahun 1990 lebih berfokus pada terak besi dalam perspektif proyek sipil. Studi perbandingan terak dalam dua kategori tersebut digambarkan pada Gambar 2.

Terak Non-besi (NFS)

Terak adalah produk sampingan cair dari proses suhu tinggi yang terutama digunakan untuk memisahkan unsur logam dan non-logam dalam bijih bahan mentah dalam jumlah besar. Ketika didinginkan, terak cair berubah menjadi material berbatu atau granular [20]. Jenis terak utama dihasilkan dari produksi utama bijih besi yang memproduksi besi dan baja dan dari bijih non-besi yang memulihkan dan memproses logam *non-ferrous*. Potensi terak daur ulang memiliki total produksi NFS global dalam metrik ton sekitar 23, 14, 11 dan 60 untuk tembaga, seng, timah dan aluminium dalam urutan tersebut [21]. Sekitar 4 juta ton terak tembaga diproduksi setiap tahunnya di Amerika Serikat serta terak fosfor, sementara produksi jenis NFS lainnya yang mengandung terak nikel, timbal dan seng diperkirakan di bawah 1 juta ton [20].



Gambar 2. Penelitian tentang terak

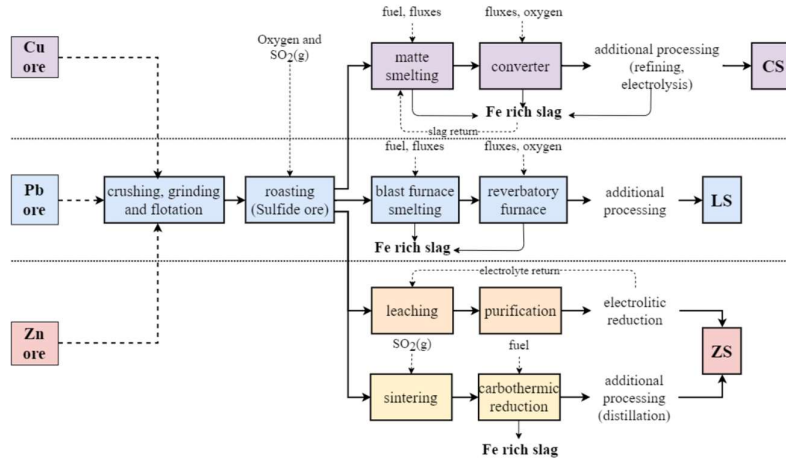
Tipe dan Proses Terak Non-besi

Terdapat tiga kategori terak non-besi (NFS): terak tembaga dan nikel, terak timah/seng, dan terak fosfor sebagai hasil dari batu atau produk sampingan yang tergranulasi [22]. Bentuk visual NFS ditunjukkan pada Gambar 3 [15]. Terak tembaga/*chopper slag* (CS) dan terak nikel/*nickle slag* (NS) dihasilkan dari proses pembakaran, peleburan, dan konversi. Dalam proses pembakaran, kandungan sulfur dihilangkan sebagai sulfur dioksida (SO_2). Proses peleburan mencairkan produk yang terbakar dalam aliran yang mengandung silika dan logam direduksi. Cairan tersebut didesulfurisasi dengan aliran kapur, bijih besi, atau terak dasar dalam proses konversi dan kemudian oksigen dialirkan untuk menghilangkan kotoran atau bahan lain yang tidak terpakai. CS yang diperoleh dari peleburan tembaga di perapian disebut terak tembaga reverberatory [20]. Laju pendinginan sangat mempengaruhi struktur butiran internal dan kandungan mineral terak, yang selanjutnya mempengaruhi sifat fisik [22]. Dalam proses produksi terak nikel [23], terak dipindahkan dari tungku bertegangan dan suhu tinggi dan dialirkan ke penampungan berisi air kemudian digranulasi menjadi bongkahan dengan ukuran maksimal 50-100 mm. Terak timbal/*lead slag* (LS), terak timbal-seng/*lead-zink slag* (LZS) dan terak seng/*zink slag* (ZS) dihasilkan selama perlakuan pirometalurgi bijih sulfida. Proses ini mencakup tiga operasi yang mirip dengan produksi NS dan CS, yaitu pembakaran, peleburan, dan konversi. Terak fosfor/*phosphorous slag* (PS) merupakan produk sampingan dari proses pemurnian senyawa fosfor. Elemen fosfor dipisahkan dari batuan pembawa fosfat dalam tanur busur listrik, dengan silika dan karbon ditambahkan sebagai pengalih untuk menghilangkan kotoran selama proses produksi terak. Besi, yang ditambahkan ke tanur, bercampur dengan fosfor untuk membentuk ferofosfor. Terak yang tersisa setelah penghilangan fosfor dan/atau ferofosfor, juga disadap. Proses pemurnian logam *non-ferrous* dengan produk samping berupa NFS ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 3. Jenis terak non-besi: (a) tembaga, (b) nikel, (c) fosfor, (d) timbal dan (e) seng [15]

Jenis tungku atau tanur yang digunakan untuk melebur bijih non-besi meliputi tanur sembur, tanur reverberatory, tanur busur listrik, dan tanur kilat oksigen. Berbeda dengan tanur yang bahan bakar dan materialnya dicampur dalam satu ruang, tanur reverberatory biasanya memisahkan material yang diolah dari gas bersuhu tinggi, tetapi tidak dari gas hasil pembakaran. Bijih tembaga dan nikel umumnya dilebur dalam tanur *reverberatory*. Tanur sembur digunakan untuk mencampur bijih tembaga (Cu/Tembaga), timbal (Pb/Plumbum), timah (Sn/Stannum), dan seng (Zn) [18], [20] dan tanur kilat oksigen untuk mengolah bijih tembaga [24]. Selanjutnya, bijih Zn biasanya diolah dalam tabung kimia yang secara bersamaan melakukan penyulingan dan penyulingan Zn. Dalam jenis tanur ini, bahan bakar dan semua produk pembakaran dipisahkan satu sama lain. NFS biasanya dikeluarkan dari tungku dan didinginkan perlahan dalam kondisi atmosfer sehingga menghasilkan material berpori kristal [18]. Ada tiga metode untuk mengkarakterisasi terak [18] yaitu metode empiris dengan pendekatan kimia, mineralogi dan uji pelindian dan metode teoritis dengan pendekatan model geokimia. Uji pencucian yang populer untuk menentukan dampak jangka panjang terak terhadap lingkungan adalah karakteristik toksikologi dan prosedur pelindian presipitasi sintesis yang dikembangkan oleh badan lingkungan USEPA. Metode lain adalah teknik flotasi [25][24] yang menghasilkan limbah pengapungan terak tembaga.



Gambar. 4. Produksi terak non-besi [18], [20]

3. KARAKTERISTIK TERAK NON-BESI

Sifat Fisik dan Kimia

Sifat fisik NFS bergantung pada jenis terak, metode produksi, jenis tungku dan prosedur pendinginan yang terkait dengan proses produksi. Tabel 1 mengilustrasikan sifat fisik terak non-besi. Kandungan terak timah dan seng hampir sama dengan terak timah lainnya dengan jumlah oksida masing-masing 4,1% dan 9,5% berat [26]. NFS bereaksi dengan air untuk membentuk kalsium silikat yang stabil, seperti semen, dan terhidrasi. Reaksi tersebut bergantung positif pada kehalusan butiran terak, komposisi kimia, dan kandungan kaca dalam terak. Tabel 2 menggambarkan sifat kimia dari terak non-besi berdasarkan beberapa temuan penelitian. Kandungan besi yang tinggi (pada dasarnya terak silikat besi) dalam terak ini tampaknya membatasi hidrolisis dan menghambat proses penggilingan [14].

Tabel 1. Sifat fisik dan teknis terak non-besi

Sifat	(NS)	(CS)	(PS)	(LZS)
Tampilan	Coklat kemerahan – coklat kehitaman, masif, bersudut, tekstur amorf	Hitam, berkilau, lebih vesikular saat tergranulasi	Hitam ke abu-abu gelap, datar dan memanjang, granulasi seragam, bersudut	Partikel hitam ke merah, berkaca, bersudut tajam (kubikal)
Berat unit, (kg/m ³)	3500 2335 [23]	2800 – 3800 2835-3858[27] 3900 [25] 3530[1]	Air-cooled: 1360 – 1440 Expanded: 880 to 100	< 2500 - 3600 3880[28]
Ukuran butir (mm)	2 – 0,150	4,75 – 0,075	4,75 – 0,075	4,75 – 0,075
LA Abrasion, (% Loss)	24,1	22,1	< 30	-
Absorption (%)	0,37 1,151[27]	0,13[25] 0,2[1]	1,0 – 1,5	5,0 0,2[28]

Sumber: [14], [20].

Dampak Terhadap Lingkungan

Terak non-besi memerlukan pemanfaatan yang lebih efisien dan optimal dalam bentuk produk yang ramah lingkungan. Perusahaan nikel di Indonesia, PT. Vale Indonesia Tbk. Operation Soroako melaporkan produksi limbah terak tanur listrik berupa terak nikel pada tahun 2017 sebanyak 4.180.479 ton [29] yang dikategorikan oleh perusahaan sebagai limbah padat. Tambang Operasional PT. Aneka Pomalaa pada tahun 2015 menghasilkan sebanyak 714.779 ton terak nikel [23] sedangkan PT. Smelting Gresik Smelter and Refinery memproduksi limbah terak tembaga sebanyak 655.000 ton per tahun [30]. Perbandingan global jumlah tambang logam non-besi terhadap terak yang diproduksi adalah 0,33-0,45 untuk tembaga [31], 0,32 (tembaga) dan 0,096 (nikel). Terak hasil pelindian logam bukan besi seperti tembaga, nikel, timbal, dan seng mengandung logam berat yang mengancam kehidupan manusia [32]. Ditemukan bahwa penggantian pasir sebanyak 10% dengan terak tembaga secara massal akan meningkatkan energi yang terkandung dan potensi pemanasan global/efek rumah kaca [31]. Pemanfaatan terak tembaga sebanyak 1000 mg dalam konstruksi menghasilkan energi antara 6,314 hingga 9,127 MJ, dengan potensi pemanasan global ekuivalen 0,971 hingga 1,486 [31].

Tabel 2. Kandungan kimia dalam terak non-besi

Unsur	Reverberatory CS (%)	NS (%)	PS (%)	LS (%)	LZS (%)
SiO ₂	36,30-38[30] 26[33] 30,60[25] [26]	29.0 42,8[23] 41,47[27] (3)	41.3	35.0 21,39[26]	17.6 25,2[25] 18,89[28]
Al ₂ O ₃	8.1 1-5[30][1] 3,3[33] 2,9[25] [26]	Trace 2,99[23] 2,58[27]	8.8 2,5-5[3]	3,56[26]	6.1 11,5[25] 8,52[28]
Fe ₂ O ₃	55[33] 59[25] [26] 48,78[1]	53.06 30,44[27] 6,69[23]	0,2-2,5[3]	28,10[26]	39,15[28]
CaO	2.0 3-7[30] 2[33] 0,66[25] [26] 4,89[1]	3.96 5,28[23]	44.1[3]	22.2 23,11[26]	19.5 19,9[25] 13,92[28]
MgO	2,7[33] 0,92[25] [26] 1,23	1.56 22,75[27] 27,6[23]	0,5-3[3]	5,44[26]	1.3 1,6[25] 2,05[28]
FeO	35.3 45-55[30]	-	-	28.7	33,8[25] 39,66[28]
K ₂ O	0,6[33] 0,48[25] [26] 0,87[1]	-	1.2	0,26[26]	0,57[28]
F	0,30[25]	-	2.8 0-2,5[3]	-	-
Pb	-	-	-	-	0,7[25] 0,61[28]
PbO	0,29[25] [26]	-	-	4,06[26]	0.8 1,37[28]

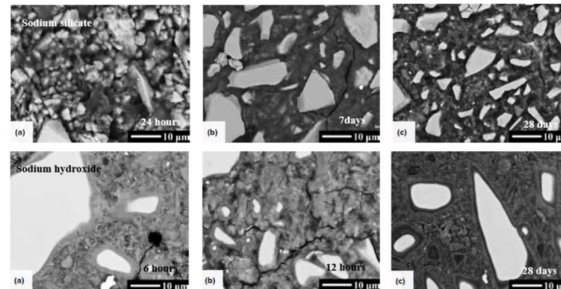
CS = terak tembaga, NS = terak nikel, PS = terak fosfor, LS = terak timbal, LZS = terak timbal/seng.

Inggris mengklasifikasikan terak dari produksi seng primer dan sekunder sebagai limbah berbahaya. Uji lindi pada inti dan kubus yang disiapkan di lokasi (7 hari) menunjukkan bahwa massa logam berat berada di bawah standar normatif dan mirip dengan sampel kontrol. Kadar timbal juga di bawah batas deteksi, kadar arsenik dapat diabaikan, dan kadar seng lebih tinggi dalam sampel inti terak seng, tetapi mirip dengan hasil kubus dan di bawah batas yang dapat diterima [22]. Risiko kontaminasi timbal pada lingkungan merupakan masalah serius, terutama di daerah yang dekat dengan tempat pembuangan limbah pabrik logam *non-ferrous*. Pelindian logam dari terak metalurgi mengandung sejumlah besar unsur beracun dan berbahaya, seperti timbal (Pb), arsenik (As), dan seng (Zn) [34]. Oleh karena itu, penting untuk menilai kandungan dan mobilitas unsur-unsur ini di tambang bahan limbah. Terak timbal primer yang dibuang di dekat peleburan dan digunakan sebagai bahan konstruksi, dianggap sebagai reservoir utama unsur-unsur dengan potensi racun yang dilepaskan secara konstan ke permukaan dan air tanah [26]. Konsentrasi seng dan kadmium (Cd) dalam terak melebihi standar kehidupan akuatik yang disyaratkan, sedangkan standar untuk tembaga dan timah hanya dilampaui secara lokal. Komposisi air permukaan dan air tanah melebihi pedoman air minum dan pedoman kehidupan air untuk kedua unsur tersebut [20]. Weston Solutions, Inc. dalam [18], [35] menyatakan bahwa lahan perumahan di kota-kota yang berdekatan dengan lokasi peleburan seng mengandung konsentrasi Co, Cu, Fe, dan Pb yang melebihi standar USEPA. Konsentrasi besar unsur-unsur ini secara rutin ditemukan di tanah jalan perumahan. Limbah akhir dan limbah padat lainnya langsung digunakan untuk menimbun dan akibatnya rentan terhadap oksidasi dan pelepasan ion selama hujan, panas, dan tekanan alam lainnya. Zat beracun dan ion logam berat juga dapat mencemari lingkungan [38]. Hasil analisis dan pemantauan data tanah dan air di sekitar tambang tembaga Oman Mine Company selama 12 tahun [39] menunjukkan penurunan nilai pH di sekitar air bawah tanah. Dengan memanfaatkan bahan-bahan berbahaya ini sebagai bahan semen, logam berat dan zat berbahaya lainnya tidak terlepas ke lingkungan yang dapat menghilangkan bahaya polusi tersembunyi. Di Cina dan Rusia, PS yang dihasilkan memiliki tingkat radiasi rendah dan banyak digunakan sebagai aditif semen [36].

4. KARAKTERISTIK TERAK NON-BESI SEBAGAI BAHAN TAMBAHAN SEMEN

Menurut ASTM C618-17a, material dengan kandungan kimia tertentu di atas 70%, dapat berperan sebagai zat tambah. **Gambar 5** menunjukkan semen terak yang diaktifkan dengan natrium silikat dan natrium hidroksida untuk berbagai durasi hidrasi. Semen Portland bersifat hidrolis dalam proses hidrasi dengan air, sedangkan pada semen terak proses hidrasi ini hanya laten sehingga proses hidrasi lanjutan pada beton dengan terak dibatasi oleh pembentukan cangkang kedap air yang cepat dan dini pada segmen eksterior partikel hidrat. Ketika terak

diaplikasikan sebagai substitusi parsial untuk semen Portland, batasan ini diatasi oleh alkalinitas yang sangat tinggi dari larutan pori, yang pada gilirannya meningkatkan hidrasi terak yang diakibatkannya [37]. Alkalinitas yang dibutuhkan dalam campuran karena kurangnya kandungan semen Portland disediakan oleh aktivator seperti natrium hidroksida. Beton terak terbukti tahan terhadap penetrasi klorida, serangan kimia dan perubahan siklus pengerasan yang ekstrem [38]. Meskipun demikian, dua masalah daya tahan, proses karbonasi dan reaksi alkali-silika, tetap menjadi perhatian serius dalam penggunaan beton karena jumlah kalsium hidroksida yang mudah dikarbonasi sangat terbatas dalam beton. Beton dengan terak yang diaktifkan oleh alkali adalah alternatif ramah lingkungan yang menjanjikan untuk teknologi beton yang mengurangi 8% hingga 50% emisi CO₂ dan mengurangi penggunaan energi hingga 40% [37], [39]. Peningkatan kekuatan beton yang mengandung SCM seperti bubuk terak dan abu terbang dalam kondisi udara dingin merupakan kendala teknis yang paling sering dilaporkan terkait penggunaan material ini dalam beton [6]. Selain kuantifikasi sifat posolanik atau hidrolik, faktor stabilitas dan durabilitas untuk berbagai rasio substitusi semen-terak memerlukan perhatian khusus [19], [39]. Semen yang mengandung terak dapat meningkatkan durabilitas beton, tetapi nilai durabilitas tersebut juga harus didukung oleh penempatan dan perawatan beton yang tepat [28], [38]. Peningkatan kekuatan lentur dari sampel campuran ini tampaknya disebabkan oleh peningkatan ikatan antara agregat dan pasta yang dihasilkan oleh *tailing* tembaga. Beton dengan durabilitas tinggi mampu bertahan lama sehingga sejalan dengan konsep berkelanjutan. Koefisien distribusi klorida akan menurun seiring dengan bertambahnya usia beton. Namun, hal ini bergantung pada material semen dan perawatan awal. Oleh karena itu, terak cenderung dianggap sebagai material yang berpotensi efektif.



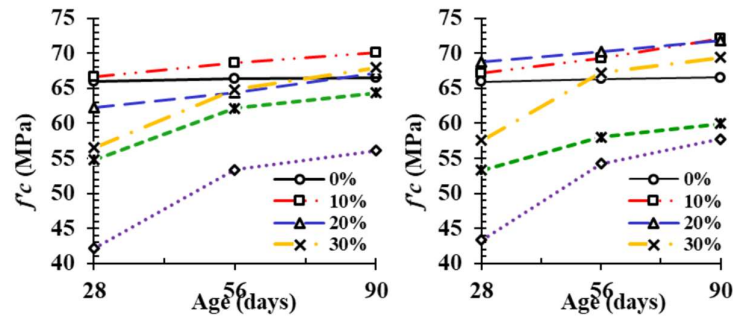
Gambar 5. Karakteristik mikrostruktural semen terak teraktivasi sodium [37]

Terak Nikel dan Terak Fosfor

Salah satu perkembangan positif adalah penggunaan NS berpendingin udara dalam jumlah besar pada rekonstruksi dan pelebaran Jalan Raya Duarte di Republik Dominika sekitar 140 kilometer [19]. Terak nikel juga digunakan untuk pembuatan konstruksi jalan tiang pancang untuk proyek perkerasan jalan [23]. Kandungan silikat di dalam NS mampu merehabilitasi ikatan antarmuka butiran dalam mortar [40]. Tingginya porsi silika menyempurnakan antarmuka akibat proses hidrasi yang baik dan mengurangi potensi kerusakan. Akibatnya, kerusakan beton mungkin tidak terjadi pada antarmuka atau membutuhkan energi yang lebih tinggi untuk menimbulkan kerusakan antarmuka [27]. Beton bermutu tinggi dengan substitusi parsial NS memiliki kuat tekan dan tarik dan modulus elastisitas yang lebih superior dengan tingkat susut lebih rendah daripada beton standar.

Komposisi campuran optimum sebesar 10% beton NS dengan luas permukaan spesifik 284 m²/kg dan 20% untuk 306 m²/kg menghasilkan kuat tekan maksimum. Observasi visual sampel beton menunjukkan minimnya pori-pori kapiler dibandingkan mortar berbahan dasar lain. Selain itu, level kepadatan tinggi berdasarkan pola kegagalan juga merupakan aspek penting dalam perbaikan kekuatan. Pola kegagalan beton NS dengan permukaan spesifik adalah pola kegagalan terbelah sedangkan beton konvensional adalah pola kegagalan geser. Secara umum, substitusi bubuk terak nikel 20% untuk bahan semen memperbaiki sifat mekanik dan daya tahan beton [27].

Gambar 6 merangkum hasil kinerja tekan beton NFS dari berbagai referensi. Terak fosfor (PS) dari alat pendingin udara tidak menunjukkan sifat-sifat semen sedangkan PS yang diperoleh dari proses pelindian memiliki sifat-sifat semen, tetapi kurang reaktif karena kandungan Al₂O₃ yang lebih rendah. Standar penggunaan PS dalam semen mensyaratkan kadar P₂O₅ maksimum di bawah 2,5%. Karena PS kurang reaktif, beton yang mengandung PS biasanya menunjukkan waktu pengerasan yang lebih lama dan kekuatan awal yang lebih rendah, meskipun secara bertahap akan meningkat seiring bertambahnya umur beton. Substitusi gipsium dengan Na₂SO₄ atau NaOH dapat mengaktifkan potensi PS dan meningkatkan kekuatan awal semen Portland secara signifikan sedangkan penggunaan aktivator Na₂SiO₃ dapat meningkatkan kekuatan beton 28 hari secara optimal [36]. Sensitivitas terak fosfor terhadap alkali dalam mortar semen diilustrasikan pada **Gambar 7**. **Gambar 8** merangkum hasil kinerja tekan beton NFS dari berbagai referensi.



Gambar 6. Kuat tekan beton berbasis terak nikel (NS) [27]

Terak Tembaga

Semen terak tembaga yang diperoleh dari proses pengapungan/*flotation* yang disebut FWCS (*Flotation Waste Chopper Slag*) dapat digunakan untuk menghasilkan sampel mortar dengan kinerja mekanis yang mirip dengan yang saat ini diproduksi menggunakan bijih besi di pabrik semen. Limbah FWCS akan mengurangi masalah lingkungan yang terkait dengan pembuangan dan memungkinkan pengurangan biaya operasi penambangan dan pemrosesan bahan baku untuk produksi semen [31], [40]. Penggunaan CS dalam bahan semen menunjukkan peningkatan kuat tekan dan kuat tarik beton yang signifikan hingga rasio substitusi 15% karena reaksi antara CS dan kalsium hidroksida. Penggunaan kapur sebagai aktivator hidrasi [1], [41] sebesar 1,5% [41], [42] menunjukkan peningkatan kekuatan karena partikel aktivator ini mengurangi porositas dan meningkatkan kinerja beton. Dibandingkan dengan beton normal, peningkatan jumlah CS dari 5% menjadi 15% umumnya meningkatkan kinerja lentur sampel beton dan peningkatan kadar CS lebih dari 15% menunjukkan penurunan kekuatan lentur [1], [33]. Kecepatan beton yang sudah mengeras meningkat dengan penambahan terak tembaga karena residu menunjukkan berat jenis yang lebih tinggi daripada semen Portland. Peningkatan 2,4% diamati pada beton dengan 20% CS jika dibandingkan dengan beton referensi [33]. Penelitian lain mengungkapkan bahwa penambahan sejumlah kecil CS ke semen mungkin meningkatkan daya tahannya [33], [43]. Kekuatan tekan beton meningkat dengan penerapan campuran CS pada rasio w/c yang lebih besar. Pada rasio 0,40, 0,5 dan 0,6, urutan peningkatan kapasitas dukung aksial beton CS setelah 28 hari adalah 2,3%, 23,8% dan 30,4% [40]. Dengan demikian, kuat tarik belah meningkat dengan terak tembaga campuran untuk semua rasio w/c. Namun, peningkatan kuat tarik lebih rendah dari kuat tekan dan lebih tinggi pada rasio w/c yang lebih rendah. Peningkatan kuat tarik sekitar 17,6% untuk w/c = 0,40, sedangkan untuk w/c = 0,60 peningkatan kuat tarik mencapai 8,5% [33]. Kecepatan beton meningkat dengan penambahan CS karena berat unit beton yang dihasilkan lebih tinggi dari beton konvensional. Peningkatan mencapai sekitar 2,4% pada sampel dengan CS 20% dibandingkan dengan beton tanpa CS. Partikel CS yang lebih kecil menghasilkan aktivitas posolonik dan menghasilkan efek pengisi. Kedua fenomena tersebut menyebabkan pori-pori mikrostruktur beton dengan CS terisi penuh sehingga menyebabkan pengurangan pori-pori dan peningkatan kualitas beton. Pengurangan penyerapan air sebesar 13,5% ditemukan pada beton dengan kandungan CS 20% [33], [44].

Kandungan CS sebesar 5% menghasilkan kekuatan yang sama dibandingkan dengan beton konvensional, terutama dalam rasio air-pengikat (w/b) yang rendah (0,5 dan 0,6). Pada rasio substitusi yang lebih tinggi, kandungan CS 13,5% menghasilkan kuat tekan yang lebih rendah. Terak tembaga dianggap memiliki sifat dan karakteristik mekanis yang unggul dan variasi komposisi yang lebih rendah dibandingkan dengan bahan konvensional [1], [33]. Penelitian laboratorium [44] mengevaluasi pemanfaatan CS dengan rasio 1/3 antara semen dan terak. Karakteristik kekuatan kubus beton pada usia tiga dan tujuh hari menunjukkan bahwa beton yang dimodifikasi memiliki kuat tekan yang secara signifikan lebih tinggi daripada beton normal. Kuat tekan beton CS adalah 28,8 MPa dan beton normal adalah 13,7 MPa dalam 3 hari dan meningkat menjadi 35,7 MPa dan 22,5 MPa masing-masing pada hari ke tujuh. Konsistensi beton pemadatan manual meningkat dengan penambahan terak. Pemanfaatan *ground copper slag* (GCS) dalam penggantian semen menghasilkan kekuatan yang setara dengan beton normal dan jika hanya 5% kandungan GCS sebagai campuran, kuat tekan beton mencapai nilai tertinggi pada semua umur beton yang diuji [1]. Peningkatan kandungan GCS sebesar 15% yang menyebabkan terbentuknya senyawa C-S-H dari reaksi pozzolan antara GCS (SiO_2) dan Ca(OH)_2 menyebabkan penetrasi air ke dalam beton menjadi lebih pendek. Hal ini menunjukkan bahwa reaksi pozzolan yang terjadi pada beton GCS mempengaruhi pengurangan penetrasi air ke dalam beton [1]. Reaksi alkali dan silika yang meningkat dalam uji balok dari campuran dengan GCS setara dengan campuran konvensional. Hal ini menunjukkan bahwa GCS tidak menimbulkan risiko ASR yang lebih tinggi daripada semen Portland dalam beton [1], [44]. Beton dengan kandungan CS sebagai SCM menunjukkan peningkatan kinerja mekanis karena dua faktor utama yaitu reaksi kimia antara CS dan kalsium hidroksida dan efek pengisi pada butiran CS. Partikel berukuran mikron rata-rata 27,2 μm yang diperoleh dari penggilingan selama 60 menit menunjukkan dampak positif pada matriks dan desinfeksi antarmuka, sehingga mengurangi

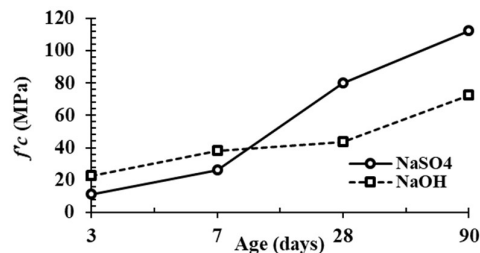
porositas dan meningkatkan kualitas beton [33], [36]. Partikel CS umumnya mengandung kadar CaO rendah yang menentukan sifat pozolaniknya. Ketika kadar CaO meningkat, partikel CS menunjukkan sifat semen yang nyata. Deja dan Malolepszy menyatakan bahwa CS yang mengandung 19% CaO menunjukkan sifat semen yang lebih baik dengan aktivator NaOH karena kekuatan beton yang dihasilkan melebihi beton konvensional [36].

Terak Seng dan Terak Timbal-Seng

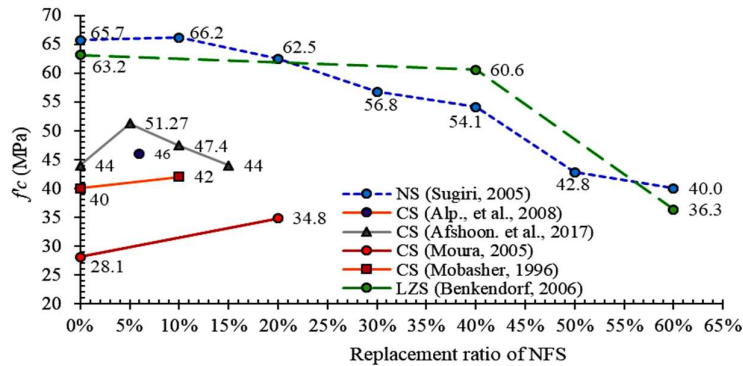
Terak seng telah digunakan untuk menghasilkan keramik dan sebagai agregat aspal. Pengujian beton yang mengandung semen dengan LZS di Newcastle menunjukkan kuat tekan beton terak yang sebanding dengan beton normal. Terak yang digunakan mengandung konsentrasi kaca/silika yang sangat tinggi sekitar 95% sebagai indikator aktivitas hidrolik atau posolanik yang tinggi. Namun, terdapat penurunan waktu pembentukan dan kekuatan awal beton dalam campuran dengan kandungan ZS tinggi [45]. Kekuatan material menurun dengan penambahan ZS dan LZS yang mencegah peningkatan sifat mekanik SCM [46]. Penelitian tentang kuat tekan beton dengan 50% ZS sebagai pengganti semen menunjukkan pencapaian yang memuaskan dan hampir semua sampel memenuhi persyaratan beton 35 MPa. Investigasi visual awal mengidentifikasi adanya sejumlah kecil rangkaiak/*creep* dan penyusutan beton. Penyelidikan pada bulan ke-30 menunjukkan kesamaan kuat tekan beton dan elemen beton dalam kondisi baik meskipun terdapat sedikit penetrasi klorida sebagai akibat dari pelepasan unsur karbohidrat di musim dingin [22]. Produksi samping dari *imperial smelting furnace slags* (ISFs) pada proses peleburan bijih seng hanya memperlambat onset proses hidrasi. Proses hidrasi awal ini berdampak pada pembentukan kekuatan awal beton terutama pada 3 hari pertama dan tidak berpengaruh buruk pada kekuatan pada umur beton di atas 3 hari. Sehingga, kuat tekan beton ZS lebih optimal daripada beton konvensional pada umur 28 hari [28]. Namun, hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa timah dan seng menghambat kekuatan awal beton pada persentase substitusi slag yang lebih tinggi [10].

Reaksi Alkali-Silika (ASR)

Reaksi alkali-silika merupakan faktor penting dalam penggunaan material pengganti semen Portland untuk produksi beton. Reaksi ini bergantung pada jenis, ukuran butiran, dan proporsi substitusi SCM yang digunakan dalam mortar. Jika ukuran partikel material sangat halus, ASR akan berlangsung cepat sehingga memengaruhi karakteristik campuran semen selama proses hidrasi dan berfungsi sebagai pozzolan [2]. Semakin halus partikel, semakin sedikit retakan mikro yang mereduksi ASR. Hal ini kemudian akan membentuk ikatan antarmuka yang lebih kuat antara material, meningkatkan kekuatan beton dan mengurangi retak. Sebaliknya, ukuran partikel yang lebih besar akan memperlambat ASR [47] sehingga reaksi tidak akan terjadi hingga beton mengeras. Reaksi yang melambat ini membentuk pasta dengan kandungan kalsium rendah yang tidak dapat bereaksi dalam struktur mikro beton. Efek ini menyebabkan adanya retakan ekspansif dan kerusakan pada beton. Diamati bahwa terak tembaga giling dalam mortar semen meningkatkan ekspansi ASR. Setelah 6 minggu perawatan, permukaan semua batang mortar tetap cukup halus tanpa retakan [1]. Tingkat alkali yang diizinkan dalam beton perlu dikurangi dengan memastikan tingkat kelembaban relatif lingkungan yang berdekatan (<75%) dan memilih bahan non-reaktif untuk mencegah ASR menghasilkan efek kegagalan pada beton. Penambahan beberapa jenis aditif diyakini dapat mencegah ekspansi ASR yang merusak. Misalnya, penambahan garam litium akan membentuk litium silikat yang tidak larut dan tidak menyerap air, atau dengan penambahan 25%-30% abu terbang menggantikan semen Portland [28]. Perilaku reaktif beton dengan SCM juga dapat dikaitkan dengan perawatan/*curing* beton. Perawatan curing uap in-situ pada beton selama 180 menit sehari [48] dapat meningkatkan sifat mekanis sampel SCM.



Gambar 7. Peningkatan kekuatan tekan mortar granulasi terak fosfor (PS) teraktivasi alkali [49]



Gambar 8. Kuat tekan beton berbasis terak non-besi

Slag Non-besi dan Korosi Beton

Korosi merupakan faktor kunci dalam pengembangan struktur beton. Beton dengan permeabilitas rendah dapat mengurangi potensi korosi pada batang tulangan struktural [1]. Pencampuran semen dengan NFS menunjukkan hasil yang berbeda dalam beberapa penelitian. Beton yang diproduksi dari semen dan terak melepaskan lebih banyak resistivitas listrik dan lebih sedikit korosi daripada beton normal dengan kondisi klorida dan kelembaban yang sama [8]. Resistivitas listrik yang lebih tinggi dari beton semen terak berkorelasi dengan koefisien difusi klorida yang lebih rendah. Dalam kisaran rasio air/pengikat 0,40 - 0,55 migrasi klorida dalam beton dengan terak sebagai SCM jauh lebih rendah daripada beton normal. Perhatian serius terhadap penetrasi klorida perlu dilakukan pada usia awal beton (7 hari) karena tingkat difusi klorida dalam beton berbasis terak sangat tinggi pada usia ini [9]. Dalam penyelidikan serupa, ditemukan bahwa tingkat korosi beton bertulang dengan terak sebagai SCM lebih kecil daripada struktur beton bertulang konvensional. Kekuatan beton dengan aktivator CS dan NaOH meningkat sedikit seiring waktu baik direndam dalam air atau dalam larutan korosif. Sebaliknya, kekuatan beton konvensional hanya meningkat ketika direndam dalam air dan menurun ketika direndam dalam larutan korosif [36]. Hal ini menunjukkan bahwa aplikasi CS teraktivasi NaOH dalam campuran beton mampu menghambat dampak korosi secara lebih sempurna daripada campuran beton normal.

Slag Non-besi dan Serangan Sulfat

Beton yang bersentuhan dengan tanah, air garam atau air limbah dapat rusak oleh sulfat (SO_4) [38]. Sulfat yang larut dalam air bereaksi dengan produk hidrasi C_3A dan kalsium hidroksida $Ca(OH)_2$. Dengan meningkatnya jumlah terak dalam sampel, kristal $Ca(OH)_2$ meningkat, kalsium silikat hidrat menurun dan strukturnya lebih longgar sehingga ada pengurangan yang stabil dalam kekuatan tekan sampel [43], [50], [51]. Terak dapat dimanfaatkan untuk mengurangi potensi serangan sulfat karena semen terak bebas dari C_3A . Serangan sulfat dapat menyebabkan kerusakan parah pada struktur beton dan mungkin terjadi dalam beberapa bentuk seperti serangan fisik garam sulfat (physical sulfate attack/PSA) dan serangan sulfat kimia. Metode pengujian standar seperti ASTM C452-15 dan ASTM C1012-15 berorientasi untuk menguji ketahanan bahan semen dari serangan kimia dan sulfat menggunakan laju ekspansi batang mortar untuk mengukur kerusakan [50]. Portland Cement Association menyatakan bahwa PSA menyebabkan kerusakan lebih parah daripada serangan kimianya. Peningkatan karbonasi pada usia dini beton dengan SCM yang tidak dirawat dengan benar dapat menyebabkan penurunan ketahanan beton terhadap PSA. Terak dengan kandungan alumina 11% lebih tinggi dapat meningkatkan reaksi alumina dengan kalsium sulfat dibandingkan dengan semen Portland. Reaksi ini menyebabkan kekurangan sulfat pada campuran beton. Hal ini mungkin mengurangi ketahanan beton segar terhadap sulfat [50], [52].

5. KESIMPULAN

Terak nikel dan tembaga dengan kandungan silika tinggi sebagai bahan tambah campuran beton berpotensi mempertinggi ketahanan beton akibat proses hidrasi yang lebih baik dan porositas rendah pada metode curing yang sesuai. Substitusi optimal sebesar 15% terak tembaga dan nikel dari total berat semen pada faktor air semen tinggi meningkatkan kuat tekan beton hingga 30%. Pemanfaatan terak non-besi sebagai pengganti sebagian semen dalam campuran beton sangat memungkinkan sebagai praktik berkelanjutan dan ramah lingkungan karena SCM berpotensi mengurangi penggunaan semen sehingga mengurangi energi yang dibutuhkan untuk memproduksi semen Portland. Biaya siklus yang lebih rendah dari beton berbasis NFS menawarkan keuntungan ekonomi bagi industri beton sekaligus berpotensi memberikan kekuatan dan ketahanan beton yang menjanjikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Afshoon and Y. Sharifi, "Use of Copper Slag Microparticles in Self-Consolidating Concrete," *ACI Mater. J.*, vol. 114, no. 5, pp. 691–699, 2017, doi: 10.14359/51700887.
- [2] S. I. Yansiku, "Characteristic of Concrete Containing Glass and Tyre Particles as Replacement of Fine Aggregate," *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 8, no. 4, p. 1055, Aug. 2018, doi: 10.18517/ijaseit.8.4.4274.
- [3] M. Albitar, P. Visintin, M. Ali, and M. Drechsler, *Assessing Behaviour of Fresh and Hardened Geopolymer Concrete Mixed with Class-F Fly Ash*, vol. 19. 2014. doi: 10.1007/s12205-014-1254-z.
- [4] R. Barnard, "Mechanical Properties of Fly Ash/Slag Based Geopolymer Concrete With the Addition of Macro Fibres," Stellenbosch University, Stellenbosch, South Africa, 2014. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10019.1/95866>
- [5] J. Bijen, "Durability of Reinforced Concrete Structures Benefits of slag and fly ash," *Constr. Build. Mater.*, vol. 10, no. 5, pp. 309–314, 1996, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00014-3](http://dx.doi.org/10.1016/0950-0618(95)00014-3).
- [6] N. Bouzoubaâ and B. Fournier, "Current situation with the production and use of supplementary cementitious materials (SCMs) in concrete construction in Canada," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 32, no. 1, pp. 129–143, 2005, doi: 10.1139/L04-109.
- [7] G. J. Osborne, "Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 21, no. 1, pp. 11–21, 1999, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(98\)00032-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(98)00032-8).
- [8] R. B. Polder, "Effects of Slag and Fly Ash on Reinforcement Corrosion in Concrete in Chloride Environment," *Heron*, vol. 57, no. 3, pp. 197–210, 2012.
- [9] H. Toutanji, N. Delatte, S. Aggoun, R. Duval, and A. Danson, "Effect of supplementary cementitious materials on the compressive strength and durability of short-term cured concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 2, pp. 311–319, 2004, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.08.017>.
- [10] B. Tripathi, A. Misra, and S. Chaudhary, "Strength and Abrasion Characteristics of ISF Slag Concrete," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 25, no. 11, pp. 1611–1618, 2013, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000709.
- [11] F. Bellmann and J. Stark, "Activation of blast furnace slag by a new method," *Cem. Concr. Res.*, vol. 39, no. 8, pp. 644–650, 2009, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.05.012>.
- [12] M. Albitar, M. S. Mohamed Ali, and P. Visintin, "Engineering Properties of Slag-based Geopolymer Concrete," 2014. doi: 10.3233/978-1-61499-466-4-503.
- [13] B. Gorai, R. K. Jana, and Premchand, "Characteristics and utilisation of copper slag—a review," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 39, no. 4, pp. 299–313, 2003, doi: 10.1016/S0921-3449(02)00171-4.
- [14] R. J. Collins and S. K. Ciesielski, *Recycling and Use of Waste Materials and Byproducts in Highway Construction*, vol. 199. Washington, DC: Nat'L Academy Press, 1994. [Online]. Available: <https://trid.trb.org/view/408316>
- [15] M. K. Dash, S. K. Patro, and A. K. Rath, "Sustainable use of industrial-waste as partial replacement of fine aggregate for preparation of concrete – A review," *Int. J. Sustain. Built Environ.*, vol. 5, no. 2, pp. 484–516, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijse.2016.04.006>.
- [16] IMF, "World Economic Outlook: Policy Pivot, Rising Threats," International Monetary Fund, Washington, 2024.
- [17] ILMATE, "Hilirisasi Pembangunan Industri Berbasis Mineral Tambang," 2016, *Kementerian Perindustrian RI, Jakarta*. [Online]. Available: <http://rocana.kemenperin.go.id/index.php/download/category/43-2016?download=491%3A4.-ilmate-hilirisasi-pembangunan-industri-berbasis-mineral-tambang>
- [18] N. Piatak, M. Parsons, and R. R. S. Ii, *Characteristics and Environmental Aspects of Slag: A Review*, vol. 57. Elsevier Ltd., 2015. doi: 10.1016/j.apgeochem.2014.04.009.
- [19] G. Wang and J. Emery, "Technology of Slag Utilization in Highway Construction," in *Annual Conference of Transportation Association of Canada, 2004 Annual Conference*, Québec City, Canada: John Emery Geotechnical Engineering Limited, 2004, pp. 1–9.
- [20] FHART, U. S. D. of Transportation, and U. S. D. of Transportation, "User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction," Federal Highway Administration Research and Technology, Washington DC, 2016.
- [21] C. Pichler, "Potential of slags from the nonferrous metallurgy," in *11th Global Slag Conference*, London, UK, 2016.
- [22] NCHRP, "Slag Byproducts, A Synthesis of Highway Practice," in *Recycled Materials and Byproducts in Highway Applications*, vol. 5, Washington, D.C.: The National Academic Press, 2013, ch. 4, pp. 19–22. doi: 10.17226/22548.
- [23] E. Bakri, "Pengelolaan Limbah Tambang Pada PT. Aneka Tambang, Tbk.," ITB, Bandung, 2014. [Online]. Available: <https://id.scribd.com/document/285507361/PENGELOLAAN-LIMBAH-PERTAMBANGAN-PADA-pdf>

- [24] T. S. Naidu, L. D. Van Dyk, C. M. Sheridan, and D. G. Grubb, "Sugar and Steel By-Product Utilization in Acid Mine Drainage Remediation," *J. Hazardous, Toxic, Radioact. Waste*, vol. 24, no. 1, p. 4019028, Jan. 2020, doi: 10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000472.
- [25] İ. Alp, H. Deveci, and H. Süngün, "Utilization of flotation wastes of copper slag as raw material in cement production," *J. Hazard. Mater.*, vol. 159, no. 2, pp. 390–395, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.056>.
- [26] L. Andrade L. and L. Bernardez, "Evaluation of the chemical stability of a landfilled primary lead smelting slag," *Environ. Earth Sci.*, vol. 68, no. 4, pp. 1033–1040, 2013, doi: 10.1007/s12665-012-1805-x.
- [27] S. Sugiri, "Penggunaan Terak Nikel sebagai Agregat dan Campuran Semen untuk Beton Mutu Tinggi," *J. Infrastruktur dan Lingkungan. Binaan*, vol. 1, no. 1, p. 8, 2005.
- [28] C. Morrison, "Improving construction sustainability by using glassy secondary materials as aggregate in concrete," Sheffield Universit, 2005.
- [29] G. Vinyaman, V. Indonesia, and C. and E. Affairs, "Sustained Commitment," PT. Vale Indonesia Tbk., Jakarta, 2017. [Online]. Available: <http://www.vale.com/indonesia/EN/aboutvale/sustainability/Pdfs/2017-Sustainability-Report-PT-Vale-Indonesia-Tbk.pdf>
- [30] SGSR, "By Product: Copper Slag MSDS." [Online]. Available: <http://www.ptsmelting.com/copperslagsds.htm>
- [31] H. W. Kua, "The Consequences of Substituting Sand with Used Copper Slag in Construction," *J. Ind. Ecol.*, vol. 17, no. 6, pp. 869–879, 2013, doi: 10.1111/jiec.12059.
- [32] PPRI, *PP Nomor 101 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya Dan Beracun*. Indonesia: Pemerintah Republik Indonesia, 2014.
- [33] W. A. Moura, J. P. Gonçalves, and M. B. L. Lima, "Copper slag waste as a supplementary cementing material to concrete," *J. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 7, pp. 2226–2230, 2007, doi: 10.1007/s10853-006-0997-4.
- [34] S. Reetu et al., "Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Korba Basin, India," *J. Hazardous, Toxic, Radioact. Waste*, vol. 23, no. 4, p. 5019004, Oct. 2019, doi: 10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000460.
- [35] N. Piatak, M. Parsons, and R. R. Seal II, *Characteristics and Environmental Aspects of Slag: A Review*, vol. 57. 2014. doi: 10.1016/j.apgeochem.2014.04.009.
- [36] C. Shi and J. Qian, "High performance cementing materials from industrial slags — a review," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 29, no. 3, pp. 195–207, 2000, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-3449\(99\)00060-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-3449(99)00060-9).
- [37] R. J. Thomas, Y. Hailong, A. Radlińska, and S. Peethamparan, "Alkali-Activated Slag Cement Concrete," *Concr. Int.*, vol. 38, no. 1, pp. 33–38, 2016.
- [38] Z. Lei and C. Bing, "Hydration and Properties of Slag Cement Activated by Alkali and Sulfate," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 29, no. 9, p. 4017091, Sep. 2017, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001879.
- [39] B. Raphael, N. T. R. Santos, A. S. C., Q. V. A., and C. M. Alba, "Dehydration and Rehydration of Blast Furnace Slag Cement," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 31, no. 8, p. 4019132, Aug. 2019, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002725.
- [40] İ. Alp, H. Deveci, and H. Süngün, "Utilization of flotation wastes of copper slag as raw material in cement production," *J. Hazard. Mater.*, vol. 159, no. 2–3, pp. 390–395, 2008, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.056>.
- [41] B. Mobasher, R. Devaguptapu, and A. M. Arino, "Effect of Copper Slag on the Hydration of Blended Cementitious Mixtures," in *The 1996 4th Materials Engineering Conference*, K. P. Chong, Ed., ASCE, 1996, pp. 1677–1686. doi: 10.1016/S0008-8846(97)00166-X.
- [42] R. Tixier, R. Devaguptapu, and B. Mobasher, "The effect of copper slag on the hydration and mechanical properties of cementitious mixtures," *Cem. Concr. Res.*, vol. 27, no. 10, pp. 1569–1580, 1997, doi: 10.1016/S0008-8846(97)00166-X.
- [43] O. Onuaguluchi and Ö. Eren, "Cement mixtures containing copper tailings as an additive: durability properties," *Mater. Res.*, vol. 5, no. 6, pp. 1029–1036, 2012, doi: 10.1590/S1516-14392012005000129.
- [44] O. Pavez, F. Rohas, J. Palacios, and A. Nazer, "Pozzolanic Activity of Copper Slag, Chile," in *Proceedings of the VI International Conference on Clean Technologies for the Mining Industry*, F. P. M. Sanchez, F. Vergara, S.H. Castro, Ed., Chile: University of Concepción, 2004.
- [45] P. N. Benkendorff, "Potential of lead/zinc slag for use in cemented mine backfill," *Miner. Process. Extr. Metall.*, vol. 115, no. 3, pp. 171–173, 2006, doi: 10.1179/174328506X109149.
- [46] D. Zhang, S. Shi, C. Wang, X. Yang, L. Guo, and S. Xue, "Preparation of Cementitious Material Using Smelting Slag and Tailings and the Solidification and Leaching of Pb 2+," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2015, pp. 1–7, 2015, doi: 10.1155/2015/352567.
- [47] S. I. Yansiku, "Karakteristik Kekuatan Beton dengan Glass Powder, Fly Ash dan GBFS Sebagai Material Pengganti Semen," *SIARTEK*, vol. 2, no. 2, p. 5, 2016.
- [48] I. Bali and W. Kurnia, "The Curing Method Influence on Mechanical Behavior of Reactive Powder Concrete," *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol. Vol. 8 No. 5*, vol. 8, no. 5, pp. 1976–1983, 2018, doi:

- 10.18517/ijaseit.8.5.4197.
- [49] L. Y. Shi C, Tang X, “Studies on the Activation of Phosphorus Slag,” in *Third International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Norway: American Concrete Institute SP-114, 1989, pp. 657– 666.
- [50] S. Zhutovsky and R. D. Hooton, “Effect of Supplementary Cementitious Materials on the Resistance of Mortar to Physical Sulfate Salt Attack,” London: Resilient Infrastructure, 2016, p. 11.
- [51] M. Sean and S. Yixin, “Carbonation Curing of Slag-Cement Concrete for Binding CO₂ and Improving Performance,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 22, no. 4, pp. 296–304, Apr. 2010, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000018.
- [52] R. Douglas Hooton, “Current developments and future needs in standards for cementitious materials,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 78, pp. 165–177, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.022>.