

PENGARUH JENIS AGREGAT BERAT TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN DURABILITAS BETON BERAT

Ersyah Okta Wulandari¹, Nurhasan Syah², Rusnardi Rahmat Putra³, Muhammad Akbar⁴

^{1,4}Pendidikan Teknologi dan Kejuruan, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang

^{2,3}Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang

¹wulanersyah@gmail.com, ²nurhasan@ft.unp.ac.id,

³rusnardi.rahmat@ft.unp.ac.id, ⁴mhddakbarr@student.unp.ac.id

ABSTRACT

Heavyweight concrete is a specialized construction material widely used in facilities requiring protection against ionizing radiation and the ability to withstand high structural loads. The primary characteristics of heavyweight concrete are determined by the use of high-density aggregates such as barite, magnetite, hematite, ilmenite, limonite, and serpentine, each offering distinct advantages and limitations in terms of mechanical performance, durability, and radiation shielding capability. This study aims to analyze and compare various types of heavyweight aggregates used in heavyweight concrete and evaluate their influence on the mechanical properties and long-term durability of concrete. The research employed a Systematic Literature Review (SLR) approach using the PRISMA framework. A total of 15 scientific articles published between 2020 and 2026 were selected from Scopus and Google Scholar databases. The review process consisted of identification, screening, selection, and synthesis stages based on their relevance to heavyweight aggregates, concrete mechanical properties, durability, and radiation shielding performance. The findings indicate that magnetite and hematite exhibit superior mechanical performance, characterized by higher compressive strength and elastic modulus values, while barite demonstrates the most effective gamma-ray attenuation capability. Ilmenite provides excellent resistance to aggressive environments containing sulfates and chlorides, whereas limonite and serpentine are particularly effective for neutron shielding due to their hydrogen-rich composition. In the Indonesian context, magnetite and ilmenite emerge as the most promising alternatives because of their abundant local availability and competitive technical performance. This study concludes that the selection of heavyweight aggregates should simultaneously consider structural requirements and radiation protection demands. Furthermore, hybrid formulations combining multiple heavyweight aggregates offer significant potential for optimizing the overall performance of heavyweight concrete and represent a promising direction for future infrastructure and nuclear-related applications.

Keywords: *heavyweight concrete, heavyweight aggregates, magnetite, hematite, durability, radiation shielding, systematic literature review.*

ABSTRAK

Beton berat merupakan material konstruksi khusus yang banyak digunakan pada fasilitas yang memerlukan perlindungan terhadap radiasi pengion serta kemampuan menahan beban struktural tinggi. Karakteristik utama beton berat ditentukan oleh penggunaan agregat berdensitas tinggi, seperti barit, magnetit, hematit, ilmenit, limonit, dan serpentin, yang masing-masing memiliki keunggulan dan keterbatasan dalam aspek mekanik, durabilitas, serta proteksi radiasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan berbagai jenis agregat berat yang digunakan dalam beton berat serta mengevaluasi pengaruhnya terhadap sifat mekanik dan ketahanan jangka panjang beton. Metode yang digunakan adalah Systematic Literature Review (SLR) dengan kerangka kerja PRISMA, melalui kajian terhadap 15 artikel ilmiah yang diterbitkan pada periode 2020–2026 dan diperoleh dari basis data Scopus serta Google Scholar. Tahapan penelitian meliputi pencarian, penyaringan, seleksi, dan sintesis literatur berdasarkan relevansinya terhadap topik agregat berat, sifat mekanik beton, durabilitas, dan proteksi radiasi. Hasil kajian menunjukkan bahwa magnetit dan hematit memiliki performa mekanik yang unggul dengan nilai kuat tekan dan modulus elastisitas yang tinggi, sedangkan barit menunjukkan kemampuan atenuasi sinar gamma yang paling efektif. Ilmenit memiliki ketahanan yang baik terhadap lingkungan agresif yang mengandung sulfat dan klorida, sementara limonit dan serpentin efektif dalam proteksi neutron karena kandungan hidrogen yang dimilikinya. Dalam konteks Indonesia, magnetit dan ilmenit menjadi alternatif yang paling potensial karena ketersediaan sumber daya lokal yang melimpah serta kinerja teknis yang kompetitif. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pemilihan agregat berat harus mempertimbangkan kebutuhan struktural dan proteksi radiasi secara simultan. Selain itu, penggunaan kombinasi beberapa jenis agregat berat berpotensi menghasilkan beton berat dengan kinerja yang lebih optimal untuk berbagai aplikasi infrastruktur masa depan.

Kata kunci: beton berat, agregat berat, magnetit, hematit, durabilitas, proteksi radiasi, systematic literature review

A. Pendahuluan

Beton berat merupakan salah satu material konstruksi yang memiliki peran strategis dalam pembangunan infrastruktur teknis tinggi, khususnya fasilitas yang memerlukan perlindungan terhadap radiasi pengion maupun beban struktural yang sangat besar. Karakteristik utama yang membedakan beton berat

dari beton normal terletak pada penggunaan agregat dengan densitas tinggi, yang secara langsung memengaruhi massa jenis beton keseluruhan hingga mencapai 3.200 kg/m³ atau lebih—jauh melampaui beton konvensional yang umumnya berkisar antara 2.200 hingga 2.400 kg/m³ (Neville, 2011).

Kebutuhan akan beton berat di Indonesia meningkat seiring dengan rencana pembangunan infrastruktur energi nuklir yang mulai mendapat perhatian serius dari pemerintah. Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) dan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) telah mengidentifikasi kebutuhan material pelindung radiasi sebagai salah satu tantangan teknis dalam pengembangan reaktor riset maupun reaktor daya (Sunarno & Widodo, 2019). Di luar konteks nuklir, beton berat juga diperlukan dalam konstruksi fondasi mesin berat, bunker militer, dan fasilitas penyimpanan limbah berbahaya.

Persoalan yang muncul dalam praktik rekayasa adalah tidak adanya satu jenis agregat berat yang secara universal optimal untuk semua kondisi. Setiap jenis agregat—mulai dari barit, magnetit, ilmenit, hematit, hingga serpentin—memiliki profil kinerja yang berbeda tergantung pada konteks penggunaannya. Barit mungkin unggul dalam atenuasi sinar gamma, tetapi kurang kompetitif dari segi kekuatan mekanik dibandingkan agregat berbasis besi seperti magnetit atau hematit. Pemilihan yang keliru

tidak hanya berdampak pada kinerja struktural, tetapi juga pada efisiensi biaya dan ketersediaan material di lapangan.

Kajian ini bertujuan untuk menyusun perbandingan komprehensif berbagai jenis agregat berat yang umum digunakan dalam produksi beton berat, menganalisis pengaruh masing-masing terhadap sifat mekanik dan durabilitas beton, serta menentukan jenis agregat yang paling efektif berdasarkan fungsi struktural maupun proteksi radiasi. Dengan pendekatan literatur review sistematis, kajian ini diharapkan memberikan gambaran yang terintegrasi dan analitis bagi akademisi maupun praktisi yang bekerja di bidang teknologi beton khusus.

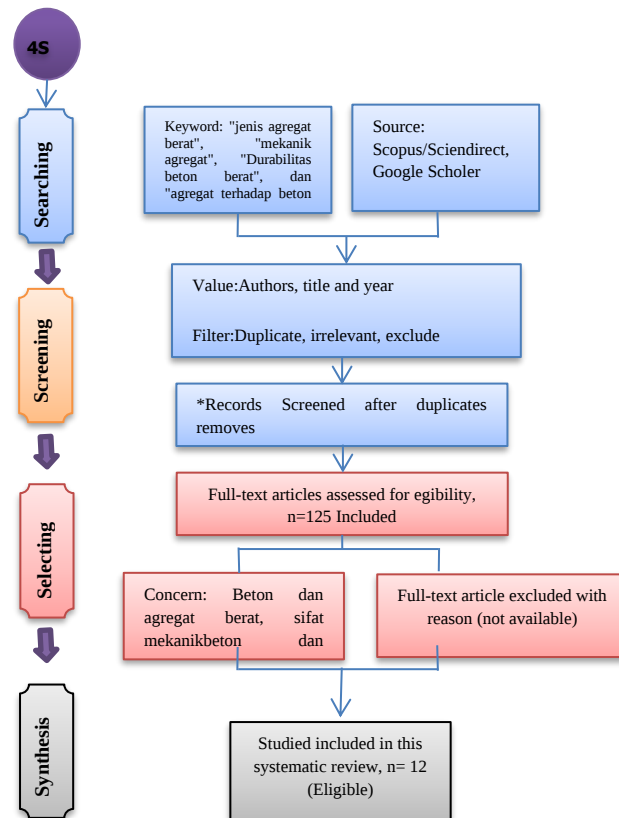
B. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode tinjauan pustaka sistematis (SLR) dan kerangka kerja PRISMA. Metode ini digunakan untuk menganalisis penelitian ini secara cermat dan meninjau literatur yang relevan secara transparan. Kerangka kerja PRISMA memberikan standarisasi dalam pengumpulan dan analisis data, yang

dapat meningkatkan reproduktifitas dan keandalan penelitian. Penelitian ini menggunakan data primer dari studi literatur, termasuk jurnal akademik dan studi kasus yang relevan, melalui tinjauan sistematis terhadap 12 publikasi ilmiah yang diterbitkan antara tahun 2022 dan 2026. Tinjauan literatur diambil dari basis data Scopus, dan Google Scholar. Scopus digunakan untuk menemukan jurnal Q1 dan Q2 terkemuka yang berkaitan dengan penelitian agregat berat dan betin berat. Sementara itu, Google Scholar digunakan untuk memperluas cakupan terkait artikel serta mengakses publikasi akses terbuka dengan kata kunci: "jenis agregat berat", "mekanik agregat", "Durabilitas beton berat", dan "agregat terhadap beton berat". Setelah mengumpulkan hasil awal, judul dan abstrak disaring berdasarkan relevansi, dilanjutkan dengan tinjauan teks lengkap untuk memastikan bahwa artikel-artikel tersebut memenuhi kriteria inklusi (Prima, et.al, 2025). Dalam studi ini, artikel-artikel yang dianalisis dalam bahasa Inggris atau Indonesia terkait dengan beton berat, agregat berat, sifat mekanik beton, dan proteksi radiasi.

C.Hasil Penelitian dan Pembahasan

Hasil penelitian ini diperoleh dari 12 artikel ilmiah yang diterbitkan antara tahun 2020 hingga 2026, yang bersumber dari basis data terkemuka seperti Scopus, dan Google Scholar. Analisis dilakukan dengan menggunakan pendekatan Analisis Isi Tematik untuk mengidentifikasi artikel-artikel tersebut. Kerangka kerja PRISMA menyediakan proses terstandarisasi untuk pengumpulan dan analisis data, yang meningkatkan reproduktifitas dan keandalan penelitian ini (SAmala AD, et.al). Empat tahap proses (4S): pencarian, penyaringan, pemilihan, dan sintesis, yang melibatkan pengumpulan, penyaringan, dan analisis data berdasarkan relevansinya dengan topik penelitian, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Searcng

Proses pencarian dalam penelitian ini dimulai dengan identifikasi kata kunci. Identifikasi dilakukan dengan menggunakan beberapa kata kunci, yaitu "jenis agregat berat", "mekanik agregat", "Durabilitas beton berat", dan "agregat terhadap beton berat". Untuk memastikan keakuratan penelitian, penelitian ini mencari artikel yang diterbitkan pada periode 2020 hingga 2026 yang diambil dari basis data Scopus, dan Google Scholar. Jumlah total artikel yang memenuhi kriteria inklusi adalah 15.

Screening

Pada tahap penyaringan judul, abstrak, dan penulis, langkah pertama adalah menyaring data berdasarkan duplikat, ketidakrelevanan, dan pengecualian. Penyaringan ini bertujuan untuk memastikan bahwa artikel yang akan disintesis relevan dan memenuhi kriteria yang ditetapkan untuk dimasukkan dalam analisis akhir. Proses penyaringan ini dapat meningkatkan akurasi validitas tinjauan dengan memastikan bahwa hanya studi berkualitas tinggi dan relevan dengan pertanyaan penelitian yang dimasukkan. Selama proses penyaringan, 125 artikel dinyatakan memenuhi syarat dan 130 artikel dikecualikan. Artikel yang dikecualikan adalah duplikat, tidak relevan, atau tidak memenuhi kriteria inklusi yang telah ditentukan sebelumnya.

Selecting

Tahap seleksi ini dilakukan untuk memilih studi yang sesuai untuk dimasukkan ke dalam penelitian, yang sangat penting guna memastikan keandalan dan validitas literatur yang ditemukan. Berdasarkan penyaringan tersebut, 125 artikel dipilih berdasarkan fokusnya pada beton

berat, agregat berat, sifat mekanik beton, dan proteksi radiasi.. Dari keseluruhan 125 artikel, 110 artikel dikecualikan berdasarkan fokusnya. Proses seleksi ini menghasilkan 15 jurnal untuk data akhir yang digunakan dalam studi ini, karena data tersebut lebih relevan dan andal, sehingga meningkatkan kredibilitas dan generalisasi temuan tinjauan.

Shyntesis

Proses ini melibatkan pengambilan dan analisis data dari setiap artikel untuk mengidentifikasi pembahasan utama. Kesimpulan dari proses sintesis ini mencakup evaluasi kritis terhadap bukti yang disajikan dalam penelitian yang ada. Kondisi penelitian ini menjadi fokus utama studi ini. Ekstraksi data dilakukan untuk mengumpulkan dan mengambil informasi kunci secara sistematis dari berbagai sumber literatur, kemudian menganalisis dan mensintesisnya untuk menghasilkan temuan yang komprehensif.

1. Konsep Dasar Beton Berat dan Peran Agregat

Sifat mekanik dan protektif beton berat sangat ditentukan oleh jenis, gradasi, dan proporsi agregat beratnya. Menurut ACI 304.3R-96,

agregat berat didefinisikan sebagai agregat dengan densitas lebih dari 2.100 kg/m^3 yang digunakan untuk menghasilkan beton dengan densitas di atas 2.900 kg/m^3 . Dari perspektif fisika, kemampuan beton dalam mengatenuasi radiasi gamma dan neutron bergantung pada dua mekanisme utama: (1) kepadatan atom dalam material yang menentukan probabilitas interaksi foton, dan (2) kandungan atom hidrogen yang berperan dalam moderasi neutron (Kharita et al., 2011).

Dalam konteks mekanik, agregat berat berinteraksi kompleks dengan matriks semen. Kualitas antarmuka antara agregat dan pasta semen—yang dikenal sebagai interfacial transition zone (ITZ)—sangat memengaruhi kekuatan tekan, modulus elastisitas, dan ketahanan retak. Agregat dengan permukaan kasar dan porositas moderat umumnya menghasilkan ikatan ITZ yang lebih kuat dibandingkan agregat berpermukaan halus dan masif (Mehta & Monteiro, 2014). Hal ini menjadi pertimbangan penting dalam memilih antara agregat alami dan buatan untuk aplikasi beton berat.

2. Karakteristik dan Kinerja Berbagai Jenis Agregat Berat

Tabel 1 merangkum perbandingan karakteristik utama dari enam jenis agregat berat yang paling banyak dikaji dalam literatur. Data ini disintesis dari berbagai studi eksperimental dan mencerminkan rentang nilai yang dilaporkan dalam kondisi pencampuran standar.

Tabel 1. Perbandingan Karakteristik Agregat Berat

Jenis Agregat	Densitas (kg/m ³)	Koef. Atenuasi	Kuat Tekan (MPa)	Ketersediaan di Indonesia
Barit	4.200–4.500	Tinggi	25–40	Terbatas (impor)
Magnetit	4.900–5.200	Tinggi	30–45	Tersedia (Kalimantan, Sulawesi)
Ilmenit	4.500–4.700	Sedang–Tinggi	28–42	Tersedia (Bangka, Belitung)
Hematit	4.600–5.000	Tinggi	32–48	Tersedia (NTT, Kalimantan)
Limonit	3.600–3.900	Sedang	20–32	Sangat tersedia
Serpentin	2.600–2.800	Sedang	18–28	Cukup tersedia

Sumber: Sintesis dari berbagai literatur (Rashid et al., 2020; Gencel et al., 2021; Metwally, 2022)

Barit (BaSO₄) adalah agregat paling banyak digunakan dalam konstruksi perisai radiasi medis dan nuklir. Densitasnya yang berkisar antara 4.200–4.500 kg/m³ dan nomor atom barium yang relatif tinggi (Z = 56) menjadikannya sangat efektif dalam mengatenuasi sinar-X dan gamma. Studi oleh Oto et al. (2013) melaporkan bahwa beton berisi barit dengan fraksi volume 60% mampu mereduksi intensitas sinar gamma Co-60 hingga 73% lebih tinggi dibandingkan beton normal dengan ketebalan yang sama. Namun, kelemahan utama barit terletak pada kecenderungan segregasi selama proses pengecoran karena perbedaan densitas yang signifikan antara agregat dan pasta semen, serta kelangkaannya di pasar domestik Indonesia yang mengharuskan impor dari Turki atau Cina.

Magnetit (Fe₃O₄) menawarkan kombinasi densitas tinggi (4.900–5.200 kg/m³) dengan kekuatan mekanik yang superior. Penelitian Rashid et al. (2020) menunjukkan bahwa beton dengan substitusi 100% agregat kasar konvensional oleh magnetit menghasilkan kuat tekan rata-rata 42 MPa pada umur 28 hari—

meningkat sekitar 18% dibandingkan beton normal. Keunggulan ini diduga terkait dengan kandungan besi yang memperkuat ikatan di zona ITZ. Dari perspektif proteksi radiasi, magnetit efektif untuk radiasi gamma maupun neutron cepat berkat kandungan oksigen yang membantu moderasi. Di Indonesia, magnetit tersedia dalam jumlah memadai di Kalimantan Timur dan Sulawesi Selatan, menjadikannya kandidat kuat untuk aplikasi domestik (Wahyudi et al., 2021).

Ilmenit (FeTiO_3) merupakan mineral titanium-besi yang banyak ditemukan di wilayah Bangka, Belitung, dan beberapa daerah di Kalimantan. Densitasnya berada pada kisaran 4.500–4.700 kg/m^3 dengan kinerja atenuasi yang baik terutama untuk radiasi sinar-X diagnostik. Sebuah studi dari Universitas Diponegoro (Suryanto & Hadi, 2022) mengonfirmasi bahwa beton dengan 70% ilmenit sebagai agregat kasar mencapai densitas 3.450 kg/m^3 dengan kuat tekan 35 MPa. Menariknya, ilmenit menunjukkan performa durabilitas yang baik dalam lingkungan sulfat berkat stabilitas mineralogi titanium oksida yang terkandung di dalamnya.

Hematit (Fe_2O_3) memiliki densitas yang kompetitif (4.600–5.000 kg/m^3) dengan kuat tekan yang relatif lebih tinggi di antara kelompok agregat besi. Studi Gencel et al. (2021) di Turki membandingkan beton berbasis hematit, magnetit, dan barit secara langsung dan menyimpulkan bahwa hematit memberikan kuat tekan tertinggi (rata-rata 46 MPa) meskipun koefisien atenuasi massanya sedikit lebih rendah dari magnetit. Ketersediaan hematit di Indonesia cukup menjanjikan, terutama dari lokasi penambangan bijih besi di Nusa Tenggara Timur dan Kalimantan Selatan yang selama ini lebih banyak diekspor mentah.

Limonit, meskipun densitasnya lebih rendah dibandingkan mineral besi lainnya, memiliki keunggulan signifikan dalam proteksi neutron termal karena kandungan air kristal (H_2O) yang relatif tinggi dalam strukturnya. Atom hidrogen dalam limonit berfungsi sebagai moderator neutron yang efisien. Penelitian Metwally (2022) memverifikasi bahwa pencampuran limonit dengan barit dalam rasio 1:1 menghasilkan beton yang lebih efektif melindungi dari radiasi neutron campuran

dibandingkan barit tunggal. Ketersediaan limonit di Indonesia sangat luas, tersebar di Kalimantan dan Papua, sehingga secara ekonomi sangat menarik untuk eksplorasi lebih lanjut.

Serpentin ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) adalah agregat yang secara khusus efektif untuk proteksi neutron berkat kandungan hidrogen dan magnesium yang tinggi. Meski densitasnya hanya sekitar 2.600–2.800 kg/m³, serpentin sering dikombinasikan dengan agregat padat lain dalam sistem beton dua-fungsi: beton berlapis yang mengombinasikan lapisan serpentin untuk moderasi neutron dan lapisan barit atau magnetit untuk atenuasi gamma (Nambiar et al., 2006). Penggunaan serpentin di Indonesia masih sangat terbatas secara komersial, meskipun cadangan mineralnya tersedia di beberapa daerah

3. Pengaruh Terhadap Sifat Mekanik

Secara umum, peningkatan densitas agregat berat berkontribusi positif terhadap kuat tekan beton, namun hubungan ini tidak selalu linear. Faktor-faktor seperti bentuk partikel, gradasi, dan nilai penyerapan

air agregat memberikan pengaruh yang kadang lebih dominan. Agregat berbentuk bulat cenderung menghasilkan workability lebih baik tetapi kuat tekan yang lebih rendah dibandingkan agregat bersudut karena penguncian mekanik (mechanical interlocking) yang lebih lemah (Neville, 2011).

Studi komparatif oleh Al-Fares (2020) menguji lima jenis beton berat dengan agregat berbeda pada rasio air-semen (w/c) yang sama (0,45) dan menemukan bahwa kuat tekan berbanding terbalik dengan rasio penyerapan air agregat. Magnetit, dengan penyerapan air kurang dari 1%, konsisten menunjukkan kuat tekan tertinggi, sementara limonit dengan penyerapan air hingga 4% menghasilkan kuat tekan terendah di antara kelompok agregat besi. Temuan ini menggarisbawahi pentingnya pra-pembasahan (pre-soaking) agregat berat sebelum pencampuran untuk menjaga rasio w/c efektif.

Modulus elastisitas beton berat umumnya lebih tinggi dari beton normal, berkorelasi dengan modulus elastisitas agregat itu sendiri. Beton berbasis hematit menunjukkan

modulus elastisitas antara 40–50 GPa, sementara beton barit hanya berkisar 25–35 GPa. Perbedaan ini signifikan dalam desain struktur yang mengutamakan kekakuan, seperti fondasi mesin berat atau pelindung reaktor yang harus menahan tekanan tinggi tanpa deformasi berlebih.

4. Durabilitas dan Ketahanan Jangka Panjang

Durabilitas beton berat menghadapi tantangan spesifik yang tidak selalu identik dengan beton normal. Pertama, potensi terjadinya alkali-silika reaktion (ASR) pada agregat tertentu menjadi perhatian khusus. Beberapa sampel barit dan magnetit dari sumber tertentu mengandung silika reaktif yang dapat memicu ekspansi dan retak pada jangka panjang. Penggunaan pozzolan seperti fly ash atau silica fume sebagai substitusi parsial semen terbukti memitigasi risiko ASR sekaligus meningkatkan kepadatan matriks (Ismail & Hashim, 2021).

Kedua, ketahanan terhadap lingkungan agresif—terutama paparan sulfat dan klorida—menjadi isu penting dalam konteks infrastruktur pesisir Indonesia. Penelitian Wahyudi et al. (2021) yang

dilakukan di Laboratorium Bahan UNDIP menguji beton berbasis ilmenit dalam larutan NaCl 3,5% selama 90 hari dan menemukan penurunan kuat tekan hanya 8,3%, jauh lebih rendah dibandingkan beton normal yang mengalami penurunan 14,7%. Kandungan titanium dalam ilmenit diduga berkontribusi pada pembentukan lapisan pasif yang menghambat difusi ion klorida.

Ketiga, resistansi terhadap paparan termal merupakan parameter krusial untuk beton perisai reaktor. Pengujian oleh Gencel et al. (2021) memperlihatkan bahwa beton hematit mempertahankan 78% kuat tekan awalnya setelah terekspos suhu 600°C, sedangkan beton barit hanya mempertahankan 58%. Hal ini disebabkan oleh transformasi fase barit menjadi BaO pada suhu tinggi yang menyebabkan ekspansi volumetrik destruktif, sementara hematit tetap stabil secara mineralogi hingga suhu 900°C.

Keempat, resistansi terhadap radiasi itu sendiri perlu dipertimbangkan. Paparan radiasi dosis tinggi dalam jangka panjang dapat memicu perubahan struktur kristal agregat tertentu melalui

mekanisme displacement damage. Magnetit dan hematit menunjukkan stabilitas radiasi yang lebih baik dibandingkan barit berdasarkan kajian Kaplan (1989) yang masih menjadi referensi klasik dalam literatur beton perisai.

5. Penerapan Di Indonesia: Peluang dan Tantangan

Relevansi kajian ini dalam konteks Indonesia mencakup beberapa dimensi. Pertama, program pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) yang sedang dimatangkan memerlukan material perisai berkualitas tinggi dengan sumber lokal yang dapat diandalkan. Ketergantungan pada impor barit dari luar negeri berisiko mengganggu rantai pasok, terutama dalam kondisi geopolitik yang tidak menentu. Magnetit dari Kalimantan dan ilmenit dari Bangka-Belitung menawarkan alternatif lokal yang secara teknis kompetitif (Sunarno & Widodo, 2019).

Kedua, industri pertambangan Indonesia menghasilkan sejumlah besar tailing dan produk sampingan yang mengandung mineral berat. Pemanfaatan mineral sisa tambang bijih besi sebagai agregat beton berat, jika dikelola dengan tepat, berpotensi

memberikan nilai tambah ganda: mengurangi limbah pertambangan sekaligus menyediakan material konstruksi berbiaya lebih rendah. Penelitian awal dari Institut Teknologi Bandung (ITB) menunjukkan bahwa tailing magnetit dari tambang nikel di Sulawesi dapat diolah menjadi agregat beton berat yang memenuhi standar ACI dengan modifikasi proses pengayakan dan pencucian (Purnomo et al., 2023).

Tantangan utama yang masih harus diatasi adalah standardisasi material dan pengujian yang belum sepenuhnya berkembang di Indonesia. Saat ini, belum ada standar nasional (SNI) khusus yang mengatur spesifikasi agregat berat untuk beton perisai, berbeda dengan Amerika Serikat yang memiliki ASTM C637 dan ASTM C638 sebagai acuan. Ketiadaan standar ini berimbas pada ketidakpastian dalam spesifikasi proyek dan hambatan dalam penerimaan material lokal oleh konsultan asing. Pengembangan SNI yang relevan menjadi kebutuhan mendesak yang perlu diinisiasi oleh Badan Standardisasi Nasional (BSN) bersama pemangku kepentingan industri.

D. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pemetaan dan analisis bibliometrik terhadap inovasi material dinding berkelanjutan pada rentang tahun 2014–2026, kesimpulan penelitian ini diuraikan. Kajian literatur ini mengonfirmasi bahwa pemilihan jenis agregat berat memiliki pengaruh signifikan dan multidimensi terhadap sifat mekanik maupun durabilitas beton berat. Magnetit dan hematit menonjol sebagai agregat dengan profil kinerja mekanik terbaik, sementara barit tetap unggul dalam aplikasi proteksi sinar gamma murni. Limonit dan serpentin mengisi ceruk yang unik dalam proteksi neutron termal yang tidak dapat dipenuhi oleh agregat berdensitas tinggi semata.

Untuk konteks Indonesia, magnetit dan ilmenit muncul sebagai kandidat paling strategis mengingat ketersediaan sumber daya alam yang melimpah, potensi pengembangan industri agregat berat berbasis mineral lokal, dan kinerja teknis yang secara keseluruhan kompetitif. Pendekatan formulasi hibrida—menggabungkan dua atau lebih jenis agregat—menunjukkan potensi signifikan untuk mengoptimalkan sifat beton berat

secara terintegrasi, dan menjadi arah penelitian yang sangat prospektif untuk dikembangkan lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 304. (1996). Guide for measuring, mixing, transporting, and placing concrete: ACI 304.3R-96. American Concrete Institute.
- Al-Fares, W. (2020). Effect of heavy aggregate on the compressive strength and radiation shielding properties of heavyweight concrete. *Construction and Building Materials*, 235, 117447.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117447>
- Gencil, O., Brostow, W., Ozel, C., & Filiz, M. (2021). Concrete containing hematite for use as a radiation shielding: Mechanical, thermal and radiation properties. *Materials Science-Poland*, 28(1), 193–203.
- Ismail, I., & Hashim, H. (2021). Alkali-silica reaction in heavy concrete: Mitigation by supplementary cementitious materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(4), 04021033.

- Kaplan, M. F. (1989). Concrete radiation shielding: Nuclear physics, concrete properties, design and construction. Longman Scientific & Technical.
- Kharita, M. H., Takeyeddin, M., Alnassar, M., & Yousef, S. (2011). Development of special radiation shielding concretes using natural local materials and evaluation of their shielding characteristics. *Progress in Nuclear Energy*, 53(1), 74–84.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). Concrete: Microstructure, properties, and materials (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Metwally, I. M. (2022). Combined effect of magnetite and barite aggregates on mechanical and radiation shielding properties of heavyweight concrete. *Egyptian Journal of Chemistry*, 65(3), 421–432.
- Nambiar, E. K. K., Ramamurthy, K., & Narayanan, A. (2006). Serpentine aggregate for neutron shielding concrete. *Radiation Physics and Chemistry*, 75(5), 531–535.
- Neville, A. M. (2011). Properties of concrete (5th ed.). Pearson Education Limited.
- Oto, B., Gür, A., Kaplan, A., Kalaysı, M., & Celik, A. (2013). Radiation shielding of concretes containing different aggregates. *Radiation Physics and Chemistry*, 97, 30–35.
- Purnomo, B. H., Santoso, A., & Mulyadi, R. (2023). Potensi tailing magnetit Sulawesi sebagai agregat beton berat: Kajian awal karakterisasi dan kinerja mekanik. *Jurnal Teknik Sipil ITB*, 30(2), 115–128.
- Rashid, M. A., Dipu, M. M. H., & Hossain, F. (2020). Effect of magnetite aggregate on mechanical and radiation shielding properties of heavy concrete. *Construction and Building Materials*, 243, 118308.
- Sunarno, & Widodo, S. (2019). Kajian material perisai radiasi berbasis beton berat untuk fasilitas reaktor nuklir Indonesia. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Nuklir BATAN*, 12, 45–52.
- Suryanto, D., & Hadi, M. N. S. (2022). Karakteristik beton berat berbasis ilmenit lokal Bangka sebagai kandidat material perisai sinar-X. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan Universitas Diponegoro*, 7(1), 33–44.

Wahyudi, E., Prabowo, A., & Kusuma,
R. T. (2021). Durabilitas beton
berat agregat magnetit
Kalimantan terhadap
lingkungan agresif: Studi
eksperimental. Media
Komunikasi Teknik Sipil, 27(2),
189–199.