

BETON DENSITAS TINGGI SEBAGAI PELINDUNG RADIASI – *SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW*

(High-Density Concrete As A Radiation Shielding – Systematic Literature Review)

Prima Ranna¹, Oei Fuk Jin¹

¹Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tarumanagara

E-mail: primaranna27@gmail.com

Diterima 18 Maret 2024, Disetujui 16 September 2024

ABSTRAK

Beton densitas tinggi (High-Density Concrete, HDC) telah digunakan secara luas sebagai pelindung radiasi karena kepadatannya yang tinggi dan kemampuan menyerap sinar gamma dan neutron. Rata-rata densitas optimal HDC untuk melindungi dari berbagai jenis radiasi biasanya antara 2,2 g/cm³ hingga 3,5 g/cm³. Densitas ini dapat berubah tergantung pada jenis agregat yang digunakan, seperti serpentin, barit, siderit, magnesit, dan lain-lain. Penelitian ini menganalisis penggunaan beton densitas tinggi sebagai pelindung radiasi menggunakan *systematic literature review*. Metode penelitian menggunakan metodologi PRISMA dengan pencarian data menggunakan aplikasi *Publish or Perish* (PoP) dengan kata kunci "*High-Density Concrete*," "*Materials*," dan "*Radiation Shielding*" pada database Scopus. Analisis bibliometrik menggunakan VOSviewer memvisualisasikan hubungan antar istilah kunci dalam penelitian. Hasil menunjukkan bahwa rata-rata densitas optimal pada beton densitas tinggi untuk pelindung radiasi bervariasi, tergantung pada jenis agregat yang digunakan. Pemilihan agregat memiliki dampak signifikan pada kinerja beton dalam pelindung radiasi. Agregat seperti barit, hematit, magnetit, dan limbah industri (seperti kaca CRT dan terak EAF) efektif meningkatkan kinerja pelindung radiasi. Secara keseluruhan, kekuatan tekan beton densitas tinggi merupakan faktor penting dalam memastikan stabilitas struktural dan efektivitas sebagai perisai radiasi. Studi ini memberikan pandangan yang mendalam tentang pengembangan beton densitas tinggi sebagai pelindung radiasi dan memberikan arah bagi penelitian masa depan dalam bidang ini.

Kata Kunci: *Systematic literature review (SLR), Publish or Perish, VOSviewer, High-Density Concrete, Radiasi*

ABSTRACT

High-density concrete (HDC) has been extensively employed as radiation shielding owing to its high density and capacity to absorb gamma rays and neutrons. The optimal average density of HDC for protecting against various types of radiation generally ranges from 2.2 g/cm³ to 3.5 g/cm³. This density may vary depending on the type of aggregate used, such as serpentine, barite, siderite, magnesite, and others. The study analyzes the use of high density concrete as a radiation protector using systematic literature review. The research method uses the PRISMA methodology with data search using the Publish or Perish (PoP) application with the keywords "High-Density Concrete," "Materials," and "Radiation Shielding" on the Scopus database. Bibliometric analysis using VOSviewer visualizes relationships between key terms in research. The results show that the average optimal density on high density concrete for radiation protectors varies, depending on the type of aggregate used. The selection of aggregates has a significant impact on the performance of concrete in radiation protectors. Aggregates such as barite, hematite, magnetite, and industrial waste (such as CRT glass and EAF barrel) are effective in enhancing radiation protection performance. Overall, the compressive strength of high-density concrete is an important factor in ensuring structural stability and effectiveness as a radiation shield. This study provides an in-depth perspective on the development of high-density concrete as radiation shielding and offers directions for future research in this field.

Keywords: *Systematic literature review (SLR), Publish or Perish, VOSviewer, High Density Concrete, Radiation*

PENDAHULUAN

Beton merupakan material struktur yang banyak digunakan sebagai pelindung terhadap radiasi karena efektif, ekonomis, pemeliharaan yang rendah dan daya tahan yang cukup lama. *High-Densitas Concrete* (HDC) atau beton densitas tinggi merupakan jenis beton yang memiliki densitas tinggi dari pada beton normal. HDC digunakan untuk penyeimbang jembatan *bascule* dan lift, juga digunakan sebagai pelindung radiasi karena kepadatan yang lebih tinggi dan komposisi yang dapat menyerap sinar gamma (Kelsey et al., n.d.). Beton telah terbukti menjadi bahan pelindung yang sangat baik terhadap radiasi radioaktif dengan koefisien atenuasi linier yang mapan untuk sinar gamma dan neutron. Beton ini banyak digunakan pada pembangkit listrik tenaga nuklir, reaktor daya, akselerator partikel berenergi tinggi, sel panas, dan fasilitas medis (Roslan et al., 2019; Suwanmaneechot et al., 2021; Waly & Bourham, 2015).

Campuran HDC diperlukan bahan yang mengandung atom hidrogen untuk dapat menyerap neutron dan juga komponen lainnya didasarkan pada penerapan beton kepadatan tinggi seperti *hematit*, *magnesit*, *magnetit*, *limonit*, *barit*, *sederit*, dan juga menggunakan agregat buatan seperti *steel punching*, *iron shot* (Ouda, 2015; Roslan et al., 2019; Thomas et al., 2021)

Dalam beberapa tahun terakhir, banyak peneliti yang melaporkan hasil mengenai sifat mekanik dan penganti bahan untuk pelindung yang efisien terhadap sinar gamma. Menurut (Chen et al., 2023) penurunan sifat mekanik beton merupakan penyebab utama dalam radiasi neutron. Hasil perbandingan sifat pelindung radiasi gamma dari *lead flyash concrete* dan beton *flyash* biasa yaitu *lead flyash* mampu melindungi sinar gamma daripada beton flyash biasa (Singh et al., 2015)

Pengaruh suhu 300-800 derajat dapat mempengaruhi massa, kepadatan, kuat tekan, koefisien penyerapan sinar gamma dan perubahan dalam struktur spesimen yang diuji untuk melemahkan sinar gamma (Horszczaruk & Brzozowski, 2019)

Beton dengan agregat timbal dapat memberikan efisiensi yang lebih besar sebagai pelindung sinar. Beton dengan sintesis khusus, yang memiliki 39,195% magnetit Fe₃HAl₄ dan 15,678% timbal oksida PbO menunjukkan koefisien atenuasi massa, faktor penumpukan paparan dan nilai HVL terbaik (Waly & Bourham, 2015).

Menurut (Ouda, 2015) beton yang menggunakan agregat *magnetit* dengan penambahan 10% SF mencapai nilai kuat tekan dan sifat fisik dan mekanik yang tinggi, Sedangkan kuat tekan beton yang mengandung agregat barit mendekati nilai kuat tekan 60 MPa, campuran beton dengan agregat kasar *goethite* dan *serpentine* tidak memenuhi persyaratan beton mutu tinggi.

Penelitian terbaru mengkaji penggunaan bahan alternatif dan ramah lingkungan untuk beton pelindung.

Beberapa penelitian sifat mekanik dan pelindung radiasi dari beton dibandingkan dengan beton kelas berat biasa atau yang umum digunakan. Menurut (Çullu & Ertaş, 2016) penggunaan limbah tambang sebagai agregat untuk beton pelindung radiasi menunjukkan bahwa agregat limbah tambang tidak menyerap radiasi sebanyak agregat barit, namun jumlah radiasi yang diserap lebih tinggi dari

pada agregat batu kapur.

Karakteristik pelindung fisik dan radiasi gamma dari beton, yang mengandung agregat kasar murni (virgin) dan beton daur ulang (RCA) yang akan digunakan sebagai wadah beton yang dapat diangkut untuk limbah radioaktif menunjukkan bahwa sifat fisik beton yang mengandung RCA kurang baik dibandingkan beton yang digunakan dengan NCA, hal ini sesuai dengan penelitian lain mengenai sifat fisik beton yang digunakan dengan RCA (Han et al., 2018).

Oleh karena itu, tinjauan literatur sistematis yang bertujuan untuk mengetahui rata-rata densitas optimal beton densitas tinggi, bagaimana kekuatan tekan beton densitas tinggi terhadap kinerja perisai radiasi, dan agregat yang sesuai dengan pelindung radiasi dan pengaruh terhadap kinerja beton densitas tinggi.

METODE

Penelitian ini menggunakan metodologi PRISMA. Hal ini dapat mempermudah dalam membuat kajian untuk artikel penelitian yang terkait dengan topik yang akan dikembangkan agar lebih transparan, akurat dan mudah dalam mengambil keputusan (Rai et al., 2021).

Pertanyaan Penelitian (*Research Questions, RQ*)

Untuk menganalisis topik terbaru dari artikel yang menyelidiki beton densitas tinggi sebagai pelindung radiasi. Maka, berdasarkan hal tersebut dibuatlah pertanyaan penelitian (RQ).

Pertanyaan untuk penelitian ini dalam tinjauan sistematis adalah:

RQ1 : Berapa rata-rata densitas optimal untuk beton dengan densitas tinggi agar dapat secara efektif melindungi dari berbagai jenis radiasi?

RQ2 : Bagaimana kekuatan tekan beton dengan densitas tinggi berdampak pada kinerja perisai radiasinya?

RQ3 : Agregat dengan densitas tinggi apa yang paling sesuai untuk pelindung radiasi, dan bagaimana pengaruhnya terhadap kinerja keseluruhan beton dengan densitas tinggi?

Pencarian data

Pencarian data dilakukan menggunakan bantuan aplikasi *Publish or Perish* (PoP) menggunakan kata kunci "*High-Density Concrete*," "*Materials*," "*Radiation Shielding*". Pengumpulan data menggunakan data base Scopus, yang bertujuan untuk mengidentifikasi artikel yang relevan dan akurat.

Berdasarkan Tabel 1, diketahui hasil identifikasi 5 pencarian teratas, dalam tabel terdapat *cites* yang merupakan sitasi pada artikel tersebut, lalu *author* yang merupakan penulis, *tittle* yaitu judul artikel, dan terakhir *year* yang merupakan tahun terbitnya artikel.

Setelah memperoleh artikel menggunakan aplikasi PoP, selanjutnya untuk memvalidasi artikel secara keseluruhan sesuai dengan tujuan yang diinginkan, maka diterapkan kriteria inklusi dan eksklusi untuk memilih artikel yang relevan seperti pada Tabel 2.

Tabel 1. Identifikasi 5 pencarian teratas

| Cites | Authors | Title | Year |
|-------|--|--|------|
| 231 | F. Aslani, G. Ma, D.L. Yim Wan, G. Muselin | <i>Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules</i> | 2018 |
| 210 | W. Meng, M. Valipour, K.H. Khayat | <i>Optimization and performance of cost-effective ultra-high performance concrete</i> | 2017 |
| 196 | B. Zhang, H. Tan, W. Shen, G. Xu, B. Ma, X. Ji | <i>Nano-silica and silica fume modified cement mortar used as Surface Protection Material to enhance the impermeability</i> | 2018 |
| 184 | A. Younis, U. Ebead, P. Suraneni, A. Nanni | <i>Fresh and hardened properties of seawater-mixed concrete</i> | 2018 |
| 162 | J. Song, Y. Li, W. Xu, H. Liu, Y. Lu | <i>Inexpensive and non-fluorinated superhydrophobic concrete coating for anti-icing and anti-corrosion</i> | 2019 |

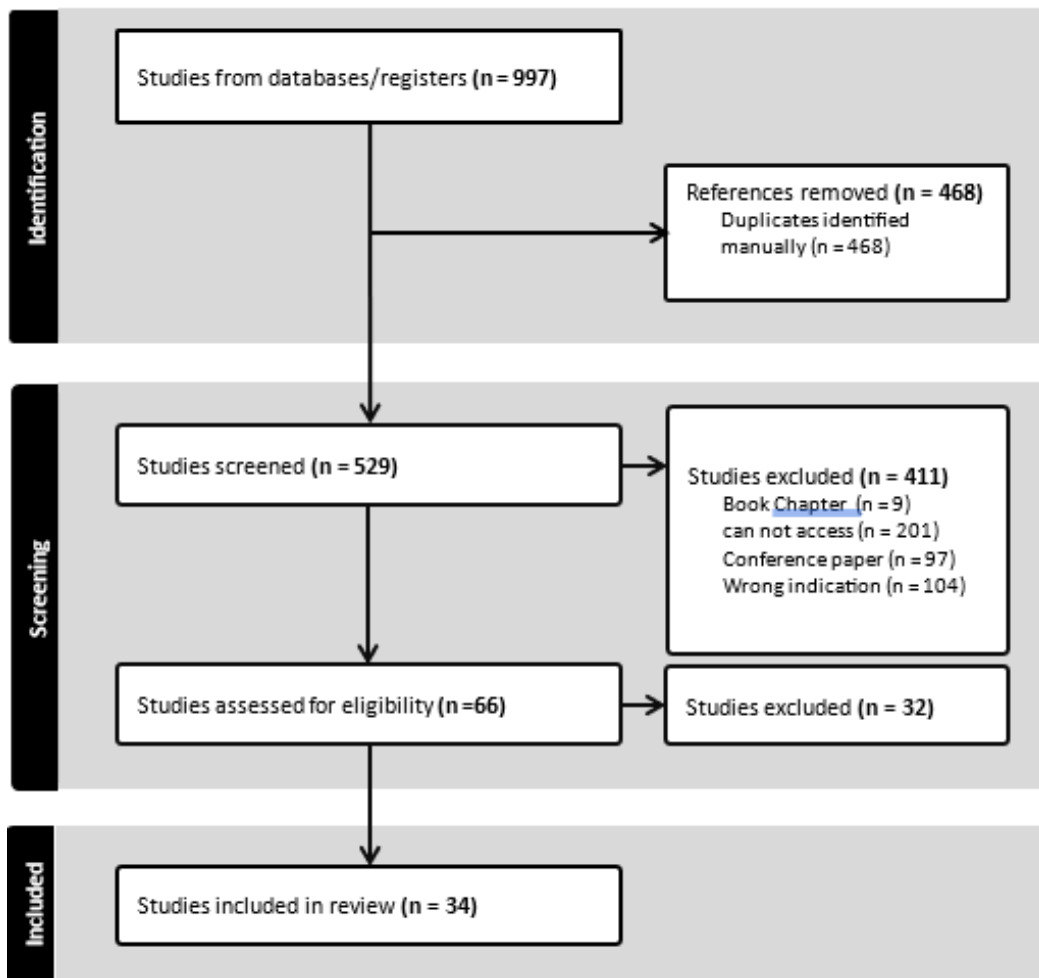
Tabel 2. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

| Kriteria Inklusi | Penjelasan |
|--|--|
| Studi yang berkaitan dengan beton densitas tinggi | Untuk menganalisis kontribusi yang diberikannya terhadap sektor industri konstruksi untuk memenuhi tujuan artikel ini. |
| Studi yang berkaitan dengan beton densitas tinggi sebagai pelindung radiasi | Untuk mendapatkan tujuan dari beton densitas tinggi sebagai pelindung radiasi |
| Artikel yang di publikasi dalam 5 sampai 10 tahun terakhir (2015-2024) | Penelitian terbaru yang mungkin hasil akan lebih efektif |
| Artikel dengan database scopus Q1-Q4 | Scopus dapat membantu menemukan literatur yang relevan dan mengidentifikasi bidang penelitian unggulan |
| Kriteria Eksklusi | Penjelasan |
| Artikel yang berupa <i>Conference Paper, Book Chapter, Conference Review, dan Review</i> | Tidak termasuk dalam tinjauan <i>literatur review</i> |
| Artikel yang berumur lebih dari 10 tahun terakhir | Gunakan artikel terbaru |
| Artikel yang sangat umum | Tidak dapat memberikan informasi yang jelas dan akurat |
| Artikel dengan bahasa selain bahasa inggris | Gunakan bahasa inggris yang dapat dimengerti oleh semua orang. |

Seleksi Hasil pencarian

Metodologi PRISMA dapat dilihat pada Gambar 1. Yang menunjukkan tiga tahapan proses pemilihan artikel yang digunakan. Tahap pertama, terdapat 468 artikel duplikat yang ditemukan dalam pencarian database, artikel tersebut dihapus, maka terdapat 529 artikel. Pada tahap kedua, seluruh artikel dianalisis, artikel yang tidak memenuhi kriteria inklusi dieliminasi dengan meninjau abstrak, type

artikel seperti *conference, book chapter, can't access, dan review*, sehingga menghasilkan 411 artikel yang tidak dimasukkan dalam penelitian dan 66 artikel yang masih harus dievaluasi. Pada tahap ketiga, kelayakan atau kesesuaian, 32 artikel dikeluarkan karena tidak terkait langsung dengan pertanyaan penelitian atau karena topik pengembangan yang sangat umum. Selanjutnya, pada tahap terakhir, tahap inklusi memiliki 34 artikel yang akan dipertimbangkan dalam penelitian.



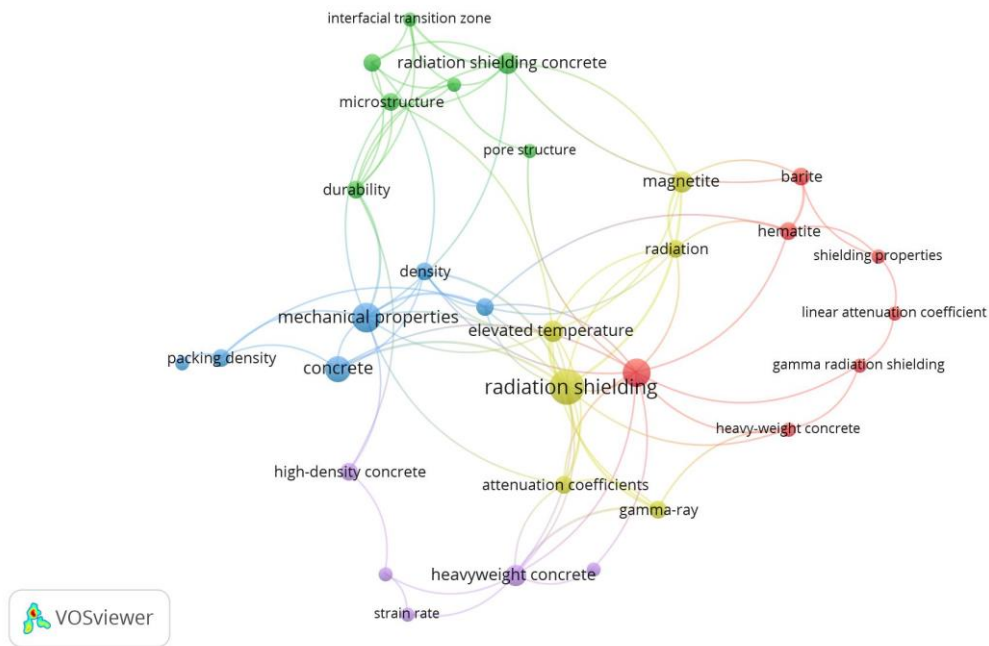
Gambar 1. Proses pemilihan artikel menggunakan metodologi PRISMA

Hasil Analisis

Aplikasi *VOSviewer* digunakan untuk memvisualisasikan jaringan bibliometrik antara jurnal, peneliti dan informasi seperti kutipan, sitasi atau co-author. Aplikasi ini memberikan informasi visual yang dapat melihat hubungan antara kata kunci yang terkait dengan artikel yang menjadi tujuan dari peneliti. *VOSviewer* dapat mengidentifikasi beton densitas tinggi sebagai pelindung radiasi dan mengaturnya berdasarkan relevansinya berdasarkan kelompok. Gambar 2. menunjukkan peta bibliometrik yang merupakan jaringan hubungan antara istilah-istilah yang paling sering digunakan dan bagaimana istilah-istilah tersebut dihubungkan satu

sama lain. *VOSviewer* menganalisis beberapa kerangka metodologi tipe beton densitas tinggi, yang diteliti dalam berbagai kondisi dan lokasi. Titik atau simpul terbesar menunjukkan terminologi yang paling banyak digunakan di antara artikel yang diulas. Analisis dilakukan terhadap judul dan abstrak menggunakan metode penghitungan ulang biner terhadap 211 kata kunci yang diperiksa dengan ambang batas minimal 2 kemunculan sehingga menghasilkan 36 terminologi.

Warna-warna yang terdapat pada *network visualization* mewakili setiap cluster dalam peta jaringan, yang dibuktikan dengan jumlah kemunculannya yang dapat di lihat pada Tabel 3.



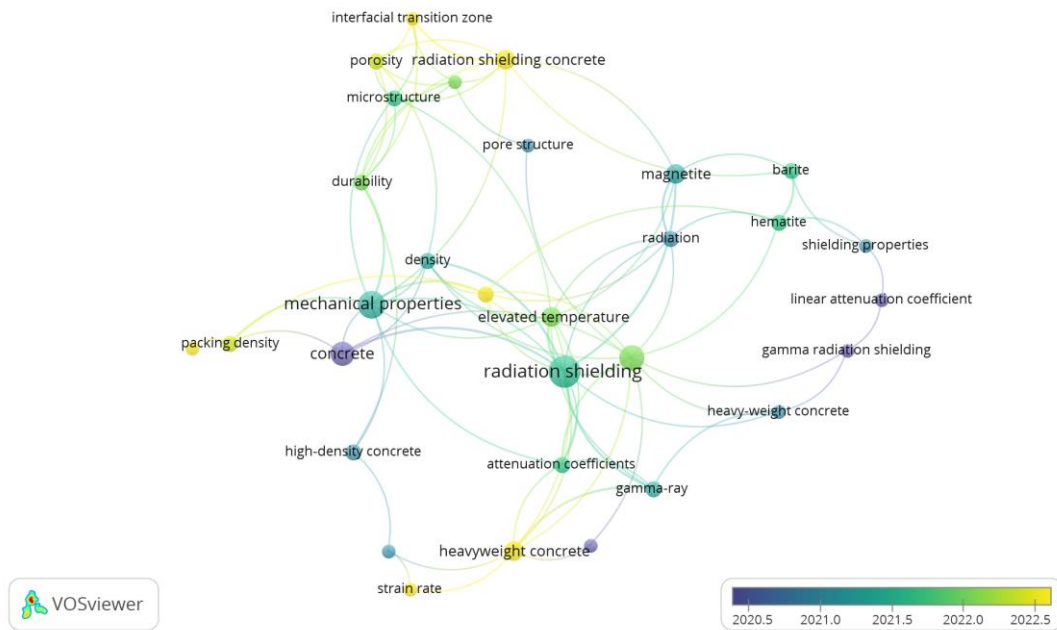
Gambar 2. Network Visualization hubungan antar istilah satu sama lain

Tabel 3. Pengelompokan kluster berdasarkan kata kunci yang sering muncul

| Kluster | warna | Kata kunci yang sering muncul |
|---------|--------|--|
| 1 | Merah | barite, compressive strength, gamma radiation shielding, heavy-weight concrete, hematite, linear attenuation coefficient, shielding properties |
| 2 | Hijau | durability, interfacial transition zone, microstructure, mix design, pore structure, porosity, radiation shielding concrete |
| 3 | Biru | concrete, density, machine learning, mechanical properties, packing density, ultra-high-performance concrete |
| 4 | Kuning | attenuation coefficients, elevated temperature, gamma-ray, magnetite, radiation, radiation shielding |
| 5 | Ungu | gamma-ray shielding, heavyweight concrete, high-density concrete, neutron radiation, strain rate |

Gambar 3. merupakan hasil visualisasi overlay dapat mengidentifikasi **state of the art** dan tren penelitian. Warna yang ditampilkan pada visualisasi ini dari yang paling gelap yaitu biru, hijau, dan kuning. Visualisasi ini memberikan pandangan dinamis dan mendalam tentang bagaimana elemen-elemen ini berhubungan satu sama lain. Dengan menggunakan warna dan ukuran yang berbeda, overlay visualization dapat menyoroti kelompok atau kategori item tertentu, seperti kata kunci yang sering muncul bersama atau publikasi yang saling mengutip.

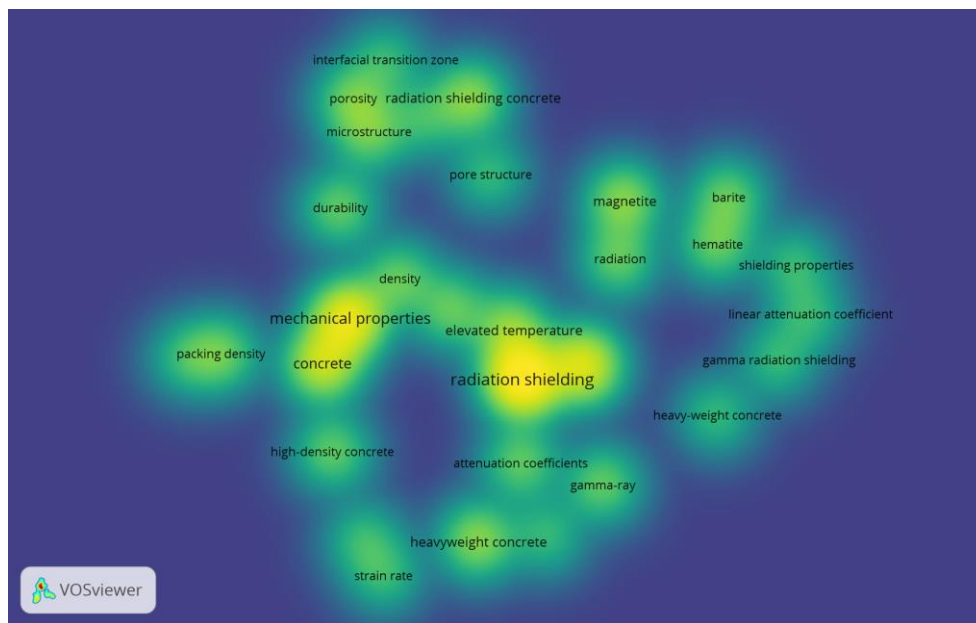
Berdasarkan Gambar 3. dapat dilihat bahwa dari tahun 2015 hingga pertengahan 2020, topik *concrete* paling banyak di publikasi, di ikuti topik-topik seperti *linier attenuation coefficient*, *gamma radiation shielding*. Pada pertengahan tahun 2020 hingga tahun 2021 topik yang paling banyak di publikasi yaitu *radiation*. Tahun 2021 hingga pertengahan 2021 yaitu *radiation shielding*. Pertengahan 2021 hingga 2022 yaitu *compressive strength*. Tahun 2022 hingga pertengahan 2022 yaitu *radiation shielding concrete*.



Gambar 3. Hasil Visualisasi Overlay

Selain itu, pada Gambar 4, visualisasi densitas mewakili densitas topik yang diteliti berdasarkan hasil observasi dan pengolahan data yang dilakukan peneliti. Semakin densitasnya tinggi maka penelitian semakin banyak atau trending. Dengan menggunakan *density visualization*, pengguna dapat memperoleh

wawasan yang lebih dalam tentang distribusi spasial dari elemen-elemen dalam jaringan, yang merupakan aspek penting dalam analisis data bibliometrik atau data jaringan lainnya. Ini membantu dalam pengambilan keputusan yang lebih baik dan pemahaman yang lebih komprehensif tentang struktur dan dinamika dalam data tersebut.



Gambar 4. Visualisasi Kepadatan

HASIL DAN PEMBAHASAN

RQ1 : Berapa rata-rata densitas optimal untuk beton dengan densitas tinggi?

Beton dengan kepadatan tinggi biasanya digunakan untuk pelindung radiasi karena kemampuannya untuk melemahkan radiasi pengion secara efektif. Rata-rata densitas optimal untuk beton densitas tinggi melindungi dari berbagai jenis radiasi, seperti sinar gamma dan

neutron, biasanya antara 2,2 g/cm³ hingga 3,5 g/cm³ (Hassan et al., 2015). Menurut Chen et al., (2023) rata-rata densitas optimal yaitu antara 3360 Kg/m³ hingga 3840 Kg/m³, tergantung pada jenis agregat yang digunakan seperti serpentin, barit, siderit, magnesit, dan lain-lain. Peneliti lain menyebutkan bahwa rata-rata densitas optimal beton densitas tinggi yaitu di atas 2600 kg/m³ hingga 4200 kg/m³, 3,0 g/cm³ dan 3,30 g/cm³ (C.

et al., 2016; Gökçe et al., 2018; Horszczaruk & Brzozowski, 2019; Masoud et al., 2020). Penelitian M. U. Khan et al., (2020) menyebutkan rata-rata kepadatan optimal beton densitas tinggi sekitar 2600-2900 kg/m³, sesuai dengan kandungan serbuk hematit (HP) dalam kisaran 10-50%. Sedangkan menurut El-Sayed (2021) padat substansial yang menggunakan mineral barit menunjukkan densitas dalam kisaran 3180-3550 kg/m³.

Beton yang disintesis secara khusus melalui penambahan bahan tertentu seperti magnetit Fe₃O₄ dan timbal oksida PbO, dengan densitas spesifik 4,64 g/cm³, menunjukkan sifat perisai sinar gamma yang unggul dibandingkan dengan komposisi beton lainnya (Waly & Bourham, 2015). Rata-rata densitas optimum menurut (Azreen et al., 2018) adalah antara 2379 kg/m³ hingga 2859 kg/m³. Densitas optimum untuk beton dengan densitas tinggi, khususnya beton yang dibuat dengan agregat terak EAF, sekitar 2.830 kg/m³ (Pomaro et al., 2019) dan menurut (Azeez et al., 2019) 2600 kg/m³ hingga 3563 kg/m³.

Densitas semua spesimen beton dengan tambahan besi potong dilaporkan dengan jelas lebih dari 3.300 kg/m³ (Daungwilailuk et al., 2022). Kepadatan beton geopolimer berbasis GGBFS (GGC) ditemukan meningkat seiring dengan meningkatnya kandungan agregat magnetit dalam campuran, rentang kepadatan optimum untuk beton densitas tinggi sekitar 2250 hingga 3210 kg/m³ (Falahatkar Gashti et al., 2023).

RQ2 : Bagaimana kekuatan tekan beton dengan densitas tinggi berdampak pada kinerja perisai radiasinya?

Radiasi neutron cepat dapat menurunkan sifat mekanik beton biasa dan beton kelas berat, khususnya kekuatan tekan. Kekuatan tekan beton magnetit dapat berkurang hingga 55%, dan beton barit hingga 80% dari kekuatan awalnya. Penurunan ini dapat mempengaruhi kinerja beton densitas tinggi sebagai perisai radiasi, yang penting untuk aplikasi seperti dinding Perisai Biologi Beton (CBS) di pembangkit listrik tenaga nuklir (Azreen et al., 2018; Chen et al., 2023; Lotfi-Omran et al., 2019).

Kuat tekan yang lebih tinggi pada beton dengan kepadatan tinggi dapat berkontribusi pada peningkatan kinerja perisai radiasi, terutama dalam kondisi suhu tinggi (Horszczaruk & Brzozowski, 2019; I. U. Khan et al., 2023). Beton yang lebih padat dapat meredam radiasi lebih efektif. Penelitian menunjukkan bahwa faktor atenuasi neutron (NAF) meningkat dengan densitas beton, memperbaiki sifat perisai radiasi. Unsur-unsur seperti Fe dan Si dalam beton densitas tinggi juga meningkatkan NAF, sehingga memperbaiki kinerja perisai radiasi (C. et al., 2016; Daungwilailuk et al., 2022). Oleh karena itu, kekuatan tekan beton densitas tinggi merupakan faktor penting yang mempengaruhi kinerja perisai radiasi dengan memastikan stabilitas struktural dan efektivitas bahan perisai terhadap radiasi (Amin et al., 2023; Baalamurugan et al., 2021; Çullu & Ertaş, 2016; El-Sayed, 2021; Masoud et al., 2020; Singh et al., 2015; Waly & Bourham, 2015).

Heavy-Weight Ultra-High-Performance Concrete (HWUHPC) tetap tidak terganggu dengan penggunaan serbuk hematit (HP) untuk mencapai kepadatan yang diinginkan. Penambahan HP malah meningkatkan densifikasi dan beberapa sifat mekanis HWUHPC melebihi beton kinerja tinggi (UHPC) referensi. Ini mengindikasikan bahwa HWUHPC dapat menawarkan kinerja perisai radiasi yang lebih baik tanpa mengorbankan sifat mekanisnya (M. U. Khan et al., 2020).

Kekuatan tekan beton densitas tinggi berbasis kaca *Cathode Ray Tube* (CRT) penting untuk kinerja perisai radiasi. Meski ada sedikit penurunan kekuatan karena kompatibilitas rendah antara kaca CRT dan matriks semen, kekuatan tekan beton ini tetap melebihi 30 MPa setelah 28 hari, memenuhi persyaratan konstruksi. Ini menunjukkan bahwa beton berbasis kaca CRT tetap cukup kuat secara struktural dan efektif sebagai perisai radiasi berkat densitas tinggi dan kandungan inti kaca CRT (LIU et al., 2019; Xia et al., 2023).

Beton dengan agregat terak *Electric Arc Furnace* (EAF) menunjukkan kekuatan tekan yang lebih tinggi, 29% dan 32% lebih besar daripada beton biasa dan beton barit. Modulus elastisitasnya juga lebih unggul, 25% dan 41% lebih tinggi. Beton dengan terak EAF memiliki sifat perisai radiasi yang setara atau lebih baik daripada beton barit, dengan ketebalan yang dibutuhkan serupa. Ini menunjukkan bahwa beton densitas tinggi dengan terak EAF efektif sebagai perisai radiasi (Papachristoforou & Papayianni, 2018; Pomaro et al., 2019).

Kekuatan tekan beton dengan densitas tinggi, yang dipengaruhi oleh persentase Ferro boron yang digunakan dalam campuran, secara langsung berdampak pada kinerja perisai radiasi. Kekuatan tekan yang lebih tinggi, hingga persentase Ferro boron yang optimal, berkontribusi pada peningkatan kemampuan perisai radiasi beton (Roslan et al., 2019).

RQ3 : Agregat dengan kepadatan tinggi apa yang paling sesuai untuk pelindung radiasi, dan bagaimana pengaruhnya terhadap kinerja keseluruhan beton dengan kepadatan tinggi?

Pemilihan agregat densitas tinggi dapat berdampak signifikan terhadap kinerja keseluruhan beton densitas tinggi dalam aplikasi pelindung radiasi. kuat tekan beton kelas berat yang mengandung agregat berbeda (misalnya magnetit, barit) ditemukan berkurang dengan meningkatnya fluensi radiasi neutron yang cepat. Penurunan kuat tekan ini dapat mempengaruhi integritas struktur dan efektivitas pelindung radiasi pada beton. Oleh karena itu, memilih agregat densitas tinggi yang sesuai dan memahami perilakunya di bawah paparan radiasi sangat penting dalam memastikan kinerja optimal beton densitas tinggi dalam aplikasi pelindung radiasi (Chen et al., 2023). Hasilnya menunjukkan bahwa beton dengan agregat magnetit menunjukkan redaman radiasi gamma tertinggi dan memiliki sifat pelindung terbaik, bahkan pada suhu tinggi. Densitas dan ketahanan agregat terhadap suhu tinggi disorot sebagai faktor penting yang menentukan kemampuan pelindung beton.

Oleh karena itu, dalam penelitian ini, agregat magnetit diidentifikasi sebagai agregat kepadatan tinggi yang paling efektif untuk meningkatkan kinerja keseluruhan beton kepadatan tinggi dalam aplikasi pelindung radiasi (El-Sayed, 2021; Horszczaruk & Brzozowski, 2019; Lotfi-Omran et al., 2019; Rashid et al., 2020; Waly & Bourham, 2015).

Agregat barit disorot sebagai agregat densitas tinggi yang cocok untuk aplikasi pelindung radiasi pada beton densitas tinggi. Agregat barit berkontribusi terhadap peningkatan berat satuan dan peningkatan koefisien atenuasi linier beton dibandingkan dengan beton biasa. Selain itu, penelitian ini menyebutkan pengaruh parameter desain campuran, campuran mineral, dan kandungan pengikat pada kinerja pelindung radiasi dari campuran beton kepadatan tinggi yang mengandung agregat barit (Gökçe et al., 2018).

Agregat hematit, khususnya, ditemukan memainkan peran penting dalam redaman neutron karena adanya unsur seperti Fe dalam agregat. Studi menunjukkan bahwa sifat pelindung neutron pada beton tidak hanya bergantung pada kadar air tetapi juga pada unsur-unsur yang ada dalam agregat seperti hematit. Penggunaan agregat seperti hematit dan baja dalam komposisi beton berkontribusi terhadap pencapaian densitas yang diperlukan untuk redaman gamma dan meningkatkan kinerja pelindung radiasi dari sampel beton densitas tinggi yang diteliti (C. et al., 2016).

Secara keseluruhan, agregat barit, hematit, dan *Cathode Ray Tube* (CTR) efektif dalam meningkatkan kinerja pelindung radiasi dari campuran beton densitas tinggi dalam penelitian ini. Barit, dengan densitas yang lebih tinggi, terkenal karena efektivitasnya dalam memoderasi neutron cepat dan meningkatkan sifat pelindung beton secara keseluruhan terhadap neutron dan sinar gamma (Azreen et al., 2018; Çullu & Ertaş, 2016; Daungwilailuk et al., 2022; M. U. Khan et al., 2020; LIU et al., 2019; Masoud et al., 2020; Xia et al., 2023).

Terak timbal, terak tembaga, dan terak baja diidentifikasi sebagai agregat yang cocok untuk aplikasi pelindung radiasi pada beton mutu tinggi. Agregat berbobot berat ini tidak hanya meningkatkan sifat mekanik beton tetapi juga meningkatkan efisiensi pelindung radiasi, menjadikannya komponen berharga dalam pengembangan bahan pelindung yang efektif untuk berbagai kebutuhan proteksi radiasi (Amin et al., 2023).

Efektivitas agregat magnetit dan steel fiber reinforcement dalam meningkatkan kinerja pelindung radiasi pada beton densitas tinggi. Penggunaan agregat ini tidak hanya meningkatkan sifat struktural beton tetapi juga secara signifikan meningkatkan kemampuannya untuk melemahkan radiasi gamma dan neutron, sehingga cocok untuk aplikasi pelindung radiasi di fasilitas nuklir dan lingkungan berenergi tinggi lainnya (Falahatkar Gashti et al., 2023).

Beton yang mengandung *Heavyweight Grit Iron Scale Aggregate* (HGSA) menunjukkan sifat pelindung radiasi yang lebih baik, dengan nilai koefisien atenuasi linier yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton biasa. Selain itu, radiografi sinar-X menunjukkan bahwa beton

HGSA memiliki struktur rongga yang lebih kompak dan minimal pada berbagai temperatur, sehingga menghasilkan sifat beton yang lebih baik (I. U. Khan et al., 2023).

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa:

1. Rata-rata densitas optimal untuk beton dengan densitas tinggi, yang digunakan sebagai pelindung radiasi, bervariasi tergantung pada jenis agregat yang digunakan.
2. Kekuatan tekan beton densitas tinggi berdampak signifikan pada kinerja perisai radiasi. Penurunan kekuatan tekan akibat paparan radiasi neutron cepat dapat mengurangi efektivitas beton. Secara keseluruhan, kekuatan tekan beton densitas tinggi merupakan faktor penting dalam memastikan stabilitas struktural dan efektivitas sebagai perisai radiasi.
3. Pemilihan agregat dengan densitas tinggi memiliki dampak signifikan pada kinerja beton dalam pelindung radiasi. Secara keseluruhan, pemilihan agregat yang tepat seperti magnetit, barit, hematit, dan berbagai terak logam dapat meningkatkan kinerja keseluruhan beton dengan densitas tinggi dalam pelindung radiasi. Integritas struktural dan efektivitas pelindung radiasi beton sangat bergantung pada pemilihan dan perilaku agregat di bawah paparan radiasi.

REFERENSI

- Amin, M., Elemam, W. E., Kandil, M. A., & Samy, M. (2023). "Effect of heavy-weight recycled materials on radiation shielding and properties of high-strength concrete with CEM III". *Journal of Building Engineering*, 79 September, 107819. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107819>
- Azeez, M. O., Ahmad, S., Al-Dulaijan, S. U., Maslehuddin, M., & Abbas Naqvi, A. (2019). "Radiation shielding performance of heavy-weight concrete mixtures". *Construction and Building Materials*, 224, 284–291. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.077>
- Azreen, N. M., Rashid, R. S. M., Haniza, M., Voo, Y. L., & Mugahed Amran, Y. H. (2018). "Radiation shielding of ultra-high-performance concrete with silica sand, amang and lead glass". *Construction and Building Materials*, 172, 370–377. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.243>
- Balamurugan, J., Kumar, V. G., Chandrasekaran, S., Balasundar, S., Venkatraman, B., Padmapriya, R., & Raja, V. K. B. (2021). "Recycling of steel slag aggregates for the development of high density concrete: Alternative & environment-friendly radiation shielding composite". *Composites Part B: Engineering*, 216 April, 108885. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108885>
- C., S. P., A.R., S., S., C., S., V., R., M., J. Ashok, K., R.,

- P., & B., V.** (2016). Effect of heat treatment on neutron attenuation characteristics of high density concretes (HDC). *Progress in Nuclear Energy*, 93, 76–83.
https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.08.003
- Chen, F., Gao, C., Jin, L., & Du, X.** (2023). "Dynamic responses of radiation-induced heavyweight concrete subjected to biaxial compression". *International Journal of Mechanical Sciences*, 257, 108519.
https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108519
- Çullu, M., & Ertaş, H.** (2016). "Determination of the effect of lead mine waste aggregate on some concrete properties and radiation shielding". *Construction and Building Materials*, 125, 625–631.
https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.069
- Daungwilailuk, T., Yenchai, C., Rungjaroenkitti, W., Pheinsusom, P., Panwisawas, C., & Pansuk, W.** (2022). "Use of barite concrete for radiation shielding against gamma-rays and neutrons". *Construction and Building Materials*, 326 November 2021, 126838.
https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126838
- El-Sayed, T. A.** (2021). "Performance of heavy weight concrete incorporating recycled rice straw ash as radiation shielding material". *Progress in Nuclear Energy*, 135 February, 103693.
https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103693
- Falathkar Gashti, M., Hosein Ghasemzadeh Mousavinejad, S., & Jalal Khaleghi, S.** (2023). "Evaluation of gamma and neutron radiation shielding properties of the GGBFS based geopolymer concrete". *Construction and Building Materials*, 367(January), 130308.
https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130308
- Gökçe, H. S., Öztürk, B. C., Çam, N. F., & Andiç-Çakır, Ö.** (2018). "Gamma-ray attenuation coefficients and transmission thickness of high consistency heavyweight concrete containing mineral admixture". *Cement and Concrete Composites*, 92 April, 56–69.
https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.05.015
- Han, D., Kim, W., Lee, S., Kim, H., & Romero, P.** (2018). "Assessment of gamma radiation shielding properties of concrete containers containing recycled coarse aggregates". *Construction and Building Materials*, 163, 122–138.
https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.078
- Hassan, H. E., Badran, H. M., Aydarous, A., & Sharshar, T.** (2015). "Studying the effect of nano lead compounds additives on the concrete shielding properties for γ -rays". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 360, 81–89.
https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.07.126
- Horszczaruk, E., & Brzozowski, P.** (2019). "Investigation of gamma ray shielding efficiency and physicomaterial performances of heavyweight concrete subjected to high temperature". *Construction and Building Materials*.
- Kelsey, R. A., Krell, W. C., Mass, G. R., & Tobin, R. E.** (n.d.). *Heavyweight Concrete : Measuring , Mixing , Transporting , and Placing Reported by ACI Committee 304*. 1–8.
- Khan, I. U., Shoaib, M., Malik, A. H., & Khan, M. N. A.** (2023). "Development and evaluation of grit iron scale-MgO heavy density concrete for moderate-temperature radiation shielding". *Construction and Building Materials*, 408(September), 133567.
https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133567
- Khan, M. U., Ahmad, S., Naqvi, A. A., & Al-Gahtani, H. J.** (2020). "Shielding performance of heavy-weight ultra-high-performance concrete against nuclear radiation". *Progress in Nuclear Energy*, 130 January, 103550.
https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103550
- LIU, H. liang, SHI, J. jun, QU, H. qiong, & DING, D. xin.** (2019). "Feasibility of using recycled CRT funnel glass as partial replacement of high density magnetite sand in radiation shielding concrete". *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 29(4), 831–839.
https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)64993-9
- Lotfi-Omran, O., Sadrmomtazi, A., & Nikbin, I. M.** (2019). "A comprehensive study on the effect of water to cement ratio on the mechanical and radiation shielding properties of heavyweight concrete". *Construction and Building Materials*, 229, 116905.
https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116905
- Masoud, M. A., Kansouh, W. A., Shahien, M. G., Sakr, K., Rashad, A. M., & Zayed, A. M.** (2020). "An experimental investigation on the effects of barite/hematite on the radiation shielding properties of serpentine concretes". *Progress in Nuclear Energy*, 120 November (2019), 103220.
https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2019.103220
- Ouda, A. S.** (2015). "Development of high-performance heavy density concrete using different aggregates for gamma-ray shielding". *Progress in Nuclear Energy*, 79, 48–55.
https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.11.009
- Papachristoforou, M., & Papayianni, I.** (2018). "Radiation shielding and mechanical properties of steel fiber reinforced concrete (SFRC) produced with EAF slag aggregates". *Radiation Physics and Chemistry*, 149 September (2016), 26–32.
https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.03.010
- Pomaro, B., Gramegna, F., Cherubini, R., De Nadal, V., Salomoni, V., & Faleschini, F.** (2019). "Gamma-ray shielding properties of heavyweight concrete with Electric Arc Furnace slag as

- aggregate: An experimental and numerical study". *Construction and Building Materials*, 200, 188–197. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.098>
- Rai, J., Prakash Yadav, G., Kumar Yadav Professor, R., Prakash Yadav Assistant Professor, G., & Rajarshri, U.** (2021). "Special Issue Applying Bibliometric and PRISMA approaches for understanding the advertising effectiveness of social networking sites (SNS)". *International Journal of Mechanical Engineering*, 6, 974–5823. <https://www.researchgate.net/publication/360872570>
- Rashid, R. S. M., Salem, S. M., Azreen, N. M., Voo, Y. L., Haniza, M., Shukri, A. A., & Yahya, M. S.** (2020). "Effect of elevated temperature to radiation shielding of ultra-high performance concrete with silica sand or magnetite". *Construction and Building Materials*, 262, 120567. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120567>
- Roslan, M. K. A., Ismail, M., Kueh, A. B. H., & Zin, M. R. M.** (2019). "High-density concrete: exploring Ferro boron effects in neutron and gamma radiation shielding". *Construction and Building Materials*, 215, 718–725.
- Singh, K., Singh, S., Dhaliwal, A. S., & Singh, G.** (2015). "Gamma radiation shielding analysis of lead-flyash concretes". *Applied Radiation and Isotopes*, 95, 174–179. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2014.10.022>
- Suwanmaneehot, P., Bongkarn, T., Joyklad, P., & Julphunthong, P.** (2021). "Experimental and numerical evaluation of gamma-ray attenuation characteristics of concrete containing high-density materials". *Construction and Building Materials*, 294, 123614. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123614>
- Thomas, C., Tamayo, P., Setién, J., Ferreño, D., Polanco, J. A., & Rico, J.** (2021). "Effect of high temperature and accelerated aging in high density micro-concrete". *Construction and Building Materials*, 272, 121920. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121920>
- Waly, E. S. A., & Bourham, M. A.** (2015). "Comparative study of different concrete composition as gamma-ray shielding materials". *Annals of Nuclear Energy*, 85, 306–310. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.05.011>
- Xia, Y., Shi, D., Wang, J., Zhao, Y., Yu, K., Liu, Y., Cui, H., & Wang, L.** (2023). "Value-added recycling of cathode ray tube funnel glass into high-performance radiation shielding concrete". *Resources, Conservation and Recycling*, 199 August, 107252. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107252>