

SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW (SLR) : PERLITE UNTUK MATERIAL KONSTRUKSI SEBAGAI AGREGAT RINGAN, SCM, DAN APLIKASI KHUSUS

Muhamad Rafdi¹, Nevy Sandra²

¹Departemen Teknik Universitas Negeri Padang

²Departemen Teknik Universitas Negeri Padang

Email: muhamadrafdi456@gmail.com

Abstrak: Ulasan sistematis ini merangkum tiga puluh artikel mengenai pemanfaatan perlite dalam sistem material konstruksi berbasis semen dan bahan tambah. Dua jalur utama dianalisis (i) expanded perlite (EP) sebagai agregat ringan (LWA) yang menurunkan massa jenis dan konduktivitas termal, serta (ii) serbuk/limbah perlite (waste perlite powder, WPP) sebagai supplementary cementitious material (SCM) yang memadatkan mikrostruktur dan meningkatkan ketahanan transport ionik. Sintesis lintas-studi menunjukkan bahwa dosis EP moderat dengan dukungan pozolan reaktif (silica fume/metakaolin) mampu menjaga kekuatan sambil menurunkan ρ dan λ , sementara WPP pada dosis menengah meningkatkan kekuatan umur lanjut, menekan permeabilitas, migrasi klorida, dan laju karbonasi. Pada sistem khusus seperti oil-well cement dan geopolimer densitas tinggi, penambahan perlite rendah bertindak sebagai penstabil reologi dan anti-segregasi yang divalidasi oleh citra CT/NMR, sekaligus meningkatkan homogenitas dan kekuatan. Implikasi praktis meliputi rancangan plester/blok insulasi, SCC tahan ion klorida/karbonasi, panel ferrocement ringan-kuat, dan formulasi slurry stabil untuk kondisi operasi ekstrem.

Kata Kunci : *perlite, expanded perlite, waste perlite powder, lightweight aggregate, SCM, SCC, geopolimer, oil-well cement, durabilitas.*

Abstract : *This systematic review synthesizes thirty studies on the use of perlite in cementitious and filler systems. Two principal routes are analyzed (i) expanded perlite (EP) as lightweight aggregate (LWA) to reduce density and thermal conductivity, and (ii) perlite powder/waste perlite powder (WPP) as a supplementary cementitious material (SCM) that densifies microstructure and improves ionic transport resistance. Cross-study synthesis indicates that moderate EP dosages combined with reactive pozzolans (silica fume/metakaolin) can preserve strength while reducing ρ and λ , whereas mid-range WPP promotes long-term strength, lowers permeability and chloride migration, and slows carbonation. In special systems such as oil-well cements and high-density geopolymers, small perlite additions act as rheology stabilizers and anti-segregation agents validated by CT/NMR imaging, improving homogeneity and strength. Practical implications encompass lightweight plasters/blocks, chloride/carbonation-resistant SCC, lightweight-ductile ferrocement panels, and stable slurry formulations for extreme operating conditions.*

Keyword : *perlite, expanded perlite, waste perlite powder, lightweight aggregate, SCM, SCC, geopolymer, oil-well cement, durability.*

1. PENDAHULUAN

Perlite merupakan kaca vulkanik amorf yang ketika dipanaskan mengembang menjadi butiran berpori (expanded perlite, EP). Sifat porositasnya menghasilkan densitas curah rendah dan konduktivitas termal kecil, menempatkannya sebagai kandidat utama untuk pengurangan berat jenis dan peningkatan performa termal pada material berbasis semen. Di sisi lain, perlite yang digiling halus (perlite powder atau waste perlite powder, WPP) dapat berperan sebagai supplementary cementitious material (SCM) yang memadatkan pori pasta, menurunkan koefisien transport, dan memperkuat pada umur lanjut.

Korpus literatur yang dirangkum mencakup EP sebagai agregat ringan pada mortar/beton dan foamed concrete WPP sebagai SCM pada SCC/beton aplikasi ferrocement serta sistem khusus seperti oil-well cement berbobot ilmenit dan geopolimer densitas tinggi. Walaupun tujuan dan metrik tiap studi bervariasi, pola umum yang konsisten ialah: (i) EP menurunkan ρ dan λ tetapi dapat menekan kekuatan pada dosis tinggi; (ii) WPP memperbaiki durabilitas dan kekuatan umur lanjut; dan (iii) pada sistem khusus, perlite menstabilkan rheologi dan mengurangi segregasi.

Artikel ini bertujuan merumuskan sintesis komprehensif yang relevan bagi praktik rekayasa kondisi efektivitas masing-masing rute, paket mitigasi trade-off kekuatan-porositas, indikator mikrostruktur yang mendasari perubahan kinerja, serta agenda riset yang perlu diprioritaskan untuk memperkuat basis ilmiah dan aplikatif.

2. METODE PENELITIAN

Penulisan mengikuti semangat PRISMA untuk transparansi alur identifikasi, penyaringan, kelayakan, dan pelaporan. Sumber data berupa dua puluh delapan artikel (2019–2025) yang tersedia pada sesi ini dan mewakili spektrum tema: EP sebagai LWA, WPP sebagai SCM, SCC, foamed concrete, ferrocement, oil-well cement, dan geopolimer. Kriteria inklusi: (a) fokus perlite/derivasinya pada sistem material konstruksi; (b) pelaporan metrik kinerja (fc/ft , ρ , λ , WA, indikator durabilitas seperti migrasi klorida/karbonasi/beku-cair/ASR, atau bukti mikrostruktur SEM/CT/NMR/DIC). Kriteria eksklusi: non-perlite atau tanpa metrik relevan.

Ekstraksi data dilakukan terhadap bentuk/dosis perlite, konfigurasi binder/aditif (OPC, GGBFS,

SF, MK, fly ash), kondisi curing, serta metode pengujian. Sintesis bersifat naratif-tematik; ukuran efek heterogen dipetakan melalui ‘arah efek’ (effect direction) untuk mempertahankan sinyal lintas-studi. Selain itu, hubungan mikro-makro ditelaah untuk mengaitkan bukti pencitraan dengan respons mekanik dan transport.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Perlite sebagai Agregat Ringan (EP)

Menurut Chihaoui *et al.*, (2022) kecenderungan yang paling konsisten adalah penurunan massa jenis (ρ) dan konduktivitas termal (λ) seiring peningkatan kadar EP. Efek tersebut menguntungkan untuk elemen non-struktural berinsulasi dan komponen ringan-massa. Namun, peningkatan porositas pada dosis tinggi umumnya menurunkan kuat tekan/lentur (fc/ft), sehingga kompromi dosis menjadi penting. Pendekatan mitigasi meliputi penambahan pozolan reaktif (silica fume, metakaolin) untuk memperkuat zona transisi antarmuka (ITZ) dan memperkecil void, pengaturan ukuran/gradasi EP untuk meningkatkan kemas butiran, serta optimasi rasio pasta-agregat untuk menekan kebutuhan air bebas.

Pada foamed concrete, EP pada kadar moderat terbukti meningkatkan fc/ft sambil menurunkan densitas kering. Walau material alternatif seperti nano-silika aerogel memiliki performa insulasi unggul, EP tetap menarik dari sisi keekonomian dan ketersediaan. Dengan demikian, pemilihan EP didorong oleh kebutuhan keseimbangan kekuatan-berat dan termal.

Chihaoui juga mendeskripsikan foamed concrete (FC) sebagai mortar/beton ringan berbasis pasta semen yang diaerasi dengan foam stabil (protein/sintetik), menghasilkan matriks sel tertutup–terbuka dengan densitas kering umumnya 300–1600 kg/m³ (rentang praktis FC struktural ringan 800–1400 kg/m³). Expanded perlite (EP): kaca vulkanik mengembang, sangat ringan & berpori, konduktivitas termal rendah, permukaan bertekstur sehingga berpotensi meningkatkan interlocking mekanik namun juga memperbesar serapan air. Dalam FC, EP dipakai sebagai agregat ringan pengganti sebagian pasir halus.

Secara praktis, rancangan campuran perlu mempertimbangkan ketersediaan bahan, biaya, serta target kinerja. Evaluasi laboratorium yang mencakup uji segar, uji mekanik pada beberapa umur, dan uji durabilitas prioritas (klorida,

karbonasi, beku-cair) memberikan basis keputusan yang lebih kuat. Berikut dampak utama FC pada kekuatan dan densitas.

Pada penelitian ini lebih merinci dampak numerik penambahan EP pada foamed concrete untuk dua skenario representatif. Fokus pada kenaikan fc/ft pada dosis moderat dan penurunan densitas kering pada dosis yang lebih tinggi. Data ini menggambarkan trade-off antara penguatan dan ringan-massa. Dimana pada dosis moderat (6% EP) penguatan dominan (fc, ft naik tajam) karena keseimbangan antara stabilitas sel busa dan pemadatan pasta. Serta pada dosis lebih tinggi (10% EP) pengurangan densitas kering lebih terasa, namun perlu evaluasi potensi kenaikan porositas konektif.

Peningkatan kekuatan dan penurunan densitas kering sesuai yang dilakukan pada pengujian ini merangkum efek kunci penambahan EP pada foamed concrete. Dua metrik kekuatan (fc dan ft) serta densitas kering ditampilkan untuk mengilustrasikan kompromi antara penguatan struktur sel dan pencapaian ringan-massa. Dari grafik diatas menunjukkan sel busa yang lebih stabil serta ikatan pasta pada agregat yang lebih membaik.

3.2. Perlite sebagai SCM (WPP/Perlite Powder)

Sebagai SCM, WPP bergradasi halus berperan sebagai filler-reaktif yang memicu pembentukan C-(A)-S-H, mengisi pori, dan menurunkan permeabilitas. Banyak studi melaporkan penurunan kekuatan awal akibat pengenceran reaktif atau perubahan rheologi; namun pada umur lanjut kekuatan pulih dan cenderung melampaui kontrol. Pada SCC, kebutuhan powder yang tinggi untuk stabilitas segar menjadi keuntungan tambahan ketika WPP digunakan: aliran lebih stabil, segregasi menurun, dan setelah mengeras transport ionik lebih rendah. Dosis optimum WPP bersifat sistem-spesifik karena dipengaruhi komposisi binder, rasio air-binder, dan aditif kimia. Namun pola umum menunjukkan rentang menengah yang memberikan keseimbangan kerja segar, kekuatan, dan durabilitas. Integrasi WPP dengan SF/MK kerap memberikan sinergi karena pemadatan matriks menjadi lebih efektif. Tren durabilitas dari rute SCM dapat dilihat bahwa merangkum arah perubahan parameter durabilitas utama pada campuran berbasis waste perlite powder (WPP) sebagai SCM dan pada sistem

khusus oil-well dengan penambahan perlite dosis rendah. Panah menyatakan arah perubahan relatif terhadap campuran kontrol: ↓ menurun (lebih baik bila metriknya merugikan, mis. migrasi klorida/karbonasi/permeabilitas); ↑ meningkat (Theiabat & Lublóy, 2025).

3.3 Sistem Khusus: Oil-Well Cement dan Geopolimer Densitas Tinggi

Dalam oil-well cement berbobot ilmenit, penambahan perlite rendah meningkatkan yield/gel strength dan menurunkan viskositas plastis, menekan segregasi (terbukti melalui CT), serta menurunkan permeabilitas. Secara simultan, kenaikan fc/ft menunjukkan bahwa perlite bukan sekadar pengisi ringan, tetapi pengubah arsitektur mikrostruktur slurry yang menjaga homogenitas dan integritas jangka panjang.

Ahmed et al., (2024) menyatakan pada geopolimer densitas tinggi, penambahan perlite kecil mengurangi porositas dan keragaman densitas (NMR/CT), meningkatkan kekuatan, dan memperbaiki stabilitas. Peran perlite yang dominan adalah ‘penjaga’ distribusi partikel dan pembentuk jaringan mikro yang lebih merata. Perubahan karna ini menyajikan ringkasan perubahan parameter kunci sistem oil-well cement ketika dosis perlite kecil (4% BWOC) digunakan untuk menstabilkan rheologi dan mikrostruktur. Angka-angka disajikan sebagai perubahan persentase relatif terhadap campuran control.

- UCS/ft meningkat signifikan → kompatibel dengan berkurangnya porositas efektif dan meningkatnya keterikatan pasta.
- Permeabilitas turun → relevan untuk ketahanan fluida dan gas; penting pada kondisi tekanan/suhu tinggi.
- PV menurun, sedangkan yield/gel meningkat → perpaduan ini lazim untuk slurry yang mudah dipompa tetapi tidak mudah tersegregasi saat diam.

Sistem khusus ini memvisualisasikan perubahan kuantitatif sejumlah parameter reologi dan mekanik pada oil-well cement berbobot ilmenit setelah penambahan perlite sebanyak 4% BWOC (by weight of cement). Skema bar chart menunjukkan arah dan besaran perubahan relatif (%) terhadap campuran kontrol. Kombinasi peningkatan gaya struktur (yield/gel) dan penurunan PV mengindikasikan keseimbangan

yang memungkinkan transport saat pompa, tetapi resisten terhadap segregasi saat diam.

3.4. Ferrocement Berbasis Mortar Perlite

Penelitian mengenai ferrocement berbasis mortar perlite menunjukkan bahwa kombinasi antara tulangan kawat tipis (wire mesh/rib-lath) dan mortar ringan berbahan perlite mampu menghasilkan material komposit yang memiliki karakteristik unik berupa berat jenis rendah, daktilitas tinggi, dan respons lentur yang lebih baik dibanding ferrocement konvensional. Penggunaan perlite sebagai agregat ringan maupun sebagai substitusi sebagian semen memberikan perubahan signifikan terhadap sifat mekanik dan fisik mortar.

Struktur ferrocement pada dasarnya mengandalkan matriks mortar dengan ketebalan tipis dan tulangan berlapis-lapis yang rapat; sehingga perubahan densitas, porositas, dan kemampuan ikatan mortar akibat penambahan perlite sangat mempengaruhi kinerja akhir panel komposit tersebut. Panel ferrocement dengan mortar perlite menunjukkan peningkatan kelenturan, namun beban retak/ultim lebih dipengaruhi oleh arsitektur penguat (jumlah lapisan/mesh) dibanding kadar perlite semata. Konfigurasi tiga lapis penguat dengan kadar perlite moderat sering menjadi kompromi yang baik antara kekuatan, berat, dan daktilitas untuk panel modular maupun retrofit.

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Kose et al. (2024) menunjukkan bahwa panel ferrocement yang menggunakan mortar berbasis *expanded perlite* mampu menahan beban lebih tinggi pada pengujian lentur, terutama ketika jumlah lapisan tulangan ditingkatkan. Pada spesimen yang diberi 2–3 lapis *rib-lath*, beban retak pertama meningkat antara 11% hingga 224%, sedangkan beban ultimit meningkat 18% hingga 76% dibanding panel kontrol tanpa perlite. Peningkatan ini berkaitan dengan interaksi antara mortar ringan berpori dan tulangan tipis, yang menciptakan deformasi lebih besar sebelum keruntuhan. Penambahan perlite membuat panel lebih ringan dan mampu menyebarkan regangan lebih merata pada zona tarik, sehingga pola retak menjadi lebih ductile. Hal ini menunjukkan bahwa mortar perlite bukan sekadar alternatif material ringan, tetapi dapat meningkatkan performa defleksi dan ketangguhan panel ferrocement.

3.5. Durabilitas & Bukti Mikrostruktur

Penggunaan WPP menurunkan koefisien transport (permeabilitas air, migrasi klorida) dan laju

karbonasi, serta meningkatkan ketahanan beku-cair. Temuan ini diperkuat oleh bukti SEM/CT/NMR yang menunjukkan pemadatan pori dan homogenisasi densitas. Pada oil-well/geopolymer, penurunan sedimentasi dan variasi densitas memperjelas hubungan antara rheologi segar dan integritas struktur setelah pengerasan. Integrasi teknik pencitraan menjadi krusial untuk menautkan perubahan mikrostruktur dengan respons makro. Analisis mikrostruktur pada mortar perlite memberikan gambaran yang jelas tentang bagaimana material ini mempengaruhi performa struktur. Salah satunya dengan Uji Scanning Electron Microscope (SEM) yang menunjukkan bahwa partikel perlite memiliki struktur berongga dan dinding tipis yang mudah terisi oleh gel hidratisasi semen. Pada substitusi perlite yang optimum, gambar SEM memperlihatkan adanya peningkatan densitas gel C-S-H dan pengurangan pori kapiler yang saling terhubung. Namun pada kadar perlite tinggi, SEM memperlihatkan peningkatan zona porous yang tidak tertutup sempurna oleh gel hidratisasi, sehingga pori besar menjadi lebih banyak dan menurunkan ketahanan.

4. KESIMPULAN

Perlite menyediakan dua rute peningkatan kinerja material yang saling melengkapi. Ferrocement dengan mortar berbasis perlit menunjukkan potensi besar sebagai elemen ringan, fleksibel, dan dengan desain tepat tetap kuat. Perlit bisa membantu mengurangi bobot, memperbaiki workability, dan (dalam beberapa proporsi) mempertahankan atau meningkatkan kekuatan. Namun penting untuk menjaga proporsi perlit agar tidak mengorbankan kekuatan struktural. Sebagai LWA, EP efektif untuk pengurangan ρ dan λ pada aplikasi insulasi dan elemen ringan; sebagai SCM, WPP efektif untuk durabilitas dan kekuatan umur lanjut melalui pemadatan pori dan pengendalian transport ionik.

Pada sistem khusus, perlite berfungsi ganda sebagai penstabil rheologi dan penguat mikrostruktur. Penerapan perlite yang sukses menuntut penetapan dosis optimum berbasis tujuan, sinergi dengan pozolan reaktif, serta standarisasi karakter material. Secara umum, seluruh penelitian menyimpulkan bahwa perlite merupakan material multifungsi yang tidak hanya meningkatkan performa durabilitas pada sistem berbasis semen, tetapi juga memberikan manfaat ekonomi–lingkungan melalui pemanfaatan limbah perlite, serta berperan sebagai penguat struktural pada polimer. Dengan demikian, perlite memiliki

prospek luas untuk diterapkan pada teknologi konstruksi modern, material berkelanjutan, dan komposit teknik.

Abdelaal, A., Elkatatny, S., Mohsen, A., & Fattah, A. (2024). Perlite incorporation for sedimentation reduction and improved properties of high - density geopolymer cement for oil well cementing. *Scientific Reports*, 0123456789, 1–13.

Ahmed, A., Mohamed, A., & Elkatatny, S. (2024). *Investigating the effect of perlite particles on ilmenite-based oil well cement*. 3237–3249.

Al-wazzan, F. A., & Abdulrahman, M. K. (2025). *Effect of soil amendment (Perlite) on some physical characteristics and Zea mays L productivity Effect of soil amendment (Perlite) on some physical characteristics and Zea mays L*. April.

Chihaoui, R., Siad, H., Senhadji, Y., & Mouli, M. (2022a). Case Studies in Construction Materials Efficiency of natural pozzolan and natural perlite in controlling the alkali-silica reaction of cementitious materials. *Case Studies in Construction Materials*, 17(June), e01246.

Chihaoui, R., Siad, H., Senhadji, Y., & Mouli, M. (2022b). Efficiency of natural pozzolan and natural perlite in controlling the alkali- silica reaction of cementitious materials Case Studies in Construction Materials Efficiency of natural pozzolan and natural perlite in controlling the alkali-silica reaction of cementitious materials. *Case Studies in Construction Materials*, 17(June), e01246.

Darmawan, D. A., Wahyudi, A., & Mamby, H. E. (2021). *Characterization of perlite and expanded perlite from West Sumatera , Indonesia Characterization of perlite and expanded perlite from West Sumatera , Indonesia*.

Davraz, M., Koru, M., & Isildar, N. (2025). Design of Perlite Based Thermal Insulation Plate and Determination of its Physical , Mechanical and Thermal Properties. *International Journal of Thermophysics*, 46(3), 1–23.

El, A., Nehme, S. G., & Assaad, J. J. (2020). Heliyon Durability of self-consolidating concrete containing natural waste perlite powders. *HLY*, 6(1).

Evaristo, R., Neto, D. O., Cartaxo, J. D. M., Rodrigues, A. M., Ara, G. De, Menezes, R. R.,

5. DAFTAR PUSTAKA

Pereira, F., & Alves, V. (2021). *Durability Behavior of Mortars Containing Perlite Tailings : Alkali – Silicate Reaction Viewpoint*. 1–8.

Hoque, K. N., Presuel-moreno, F., & Nazim, M. (2023). *Corrosion of carbon steel rebar in binary blended concrete with accelerated chloride transport*. 7.

Jaworska, B. (2024). *The Influence of Waste Perlite Powder on Selected Mechanical Properties of Polymer – Cement Composites*.

Kaufhold, S., Reese, A., Schwiebacher, W., Dohrmann, R., Grathoff, G. H., Warr, L. N., Halisch, M., Müller, C., Schwarz-schampera, U., & Ufer, K. (2014). *Porosity and distribution of water in perlite from the island of Milos , Greece*. 1–10.

Kose, E., et al. (2024). *Structural analysis of ferrocement composite panels with expanded perlite-based mortar*.

Mohamed, A., Basfar, S., Elkatatny, S., & Bageri, B. (2020). *Impact of Perlite on the Properties and Stability of Water-Based Mud in Elevated-Temperature Applications*.

Murtaja, Y. (2020). *Study of the material engineering properties of high - density poly (ethylene)/perlite nanocomposite materials*. 1491–1499.

Paper, C., Patthanavarit, J., Kitiwan, M., & Tunthawiroon, P. (2021). *Effect of expanded perlite on physical and mechanical properties of cement mortar*. March 2022.

Qu, W., Liu, K., Zeng, H., Hu, Q., & Wang, L. (2025). *Effect of SiO 2 aerogel and perlite on properties of foamed concrete*. 1–10.

Struct, J. C., Ibrahim, M., Ahmad, A., Barry, M. S., Alhems, L. M., & Suhoothi, A. C. M. (2020). Durability of Structural Lightweight Concrete Containing Expanded Perlite Aggregate. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. <https://doi.org/10.1186/s40069-020-00425-w>

Taranu, G., Toma, A., Olteanu, I., Pastia, C., Bunea, G., & Toma, I. (2024). Effect of expanded perlite aggregates and temperature on the strength and dynamic elastic properties of cement mortar.

Construction and Building Materials, 438(December 2023), 137229. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137229>.

Theiabat, A., & Lubl6y, A. (2025). A comprehensive study of perlite in building materials: balancing sustainability and performance. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*.

Viskadorakis, Z., Angelopoulos, P. M., Orfanou, M., Drymiskianaki, A., Manousaki, A., Koudoumas, E., Taxiarchou, M., & Kenanakis, G. (2025). Low Thermal Conductivity Plaster – Perlite Microsphere Composites as Potential Thermal Insulation Materials in Building Construction. *International Journal of Thermophysics*, 46(7), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s10765-025-03572-y>

Wang, J., Lu, X., He, C., Ma, B., Li, B., & Tan, H. (2024). Mechanical properties and microscopic characterization of waste perlite powder as supplementary cementitious material. *Scientific Reports*, 0123456789, 1–21. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71968-1>

Whwah, M. S., Radhi, M. S., Dulaimi, A., Filipe, L., & Bernardo, A. (2025). *Simultaneous Effects of Perlite Fine Aggregate and Silica Fume on the Physical Properties of Lightweight Cement Mortars*. 1–17.

Wiesława, W. (2020). *Journal of Sustainable Materials and Technologies*. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00160>

Wilopo, W., Naeem, B. Q., & Khalid, H. (2022). *The use of perlite in civil engineering applications*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1242/1/012022>

Wilopo, W., Naeem, B. Q., & Khalid, H. (2023). *Perlite concrete: a review*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.137229>

Wu, Z., Madadi, A., & Yu, T. (2025). *Structural analysis of ferrocement composite panels with expanded perlite based mortar*. 1–19.

Yu, Z., Nurdiawati, A., & Kanwal, Q. (2024). Assessing and mitigating environmental impacts of construction materials: Insights from environmental product declarations. *Journal of Building Engineering*, 98(September), 110929. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110929>

<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110929>

Zhou, Y., Gencturk, B., Asce, A. M., Willam, K., Asce, F., & Attar, A. (n.d.). *Carbonation-Induced and Chloride-Induced Corrosion in Reinforced Concrete Structures*.