

Structured Literature Review (SLR): Pengaruh Fly Ash dan Bottom Ash terhadap Kinerja Mekanis dan Durabilitas Beton

Novendra Gilang Ramadhan^{1*}, Nevy Sandra²

^{1,2} Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang, Kota Padang.

*Email: novendragilang22@gmail.com

Abstrak

Pemanfaatan produk sampingan industri seperti abu terbang (fly ash) dan abu dasar (bottom ash) yang secara bersama disebut FABA dalam bidang konstruksi merupakan salah satu cara untuk mengurangi dampak lingkungan dari proses pembuatan semen konvensional. Semen konvensional dibuat melalui proses pembakaran yang menghasilkan banyak gas karbon dioksida, sehingga penggunaan bahan pengganti seperti FABA dapat membantu menekan emisi tersebut. Kajian pustaka ini bertujuan untuk menilai temuan dari 20 artikel jurnal tentang pengaruh FABA terhadap kekuatan beton (kuat tekan, kuat lentur, kuat tarik belah, modulus elastisitas) dan ketahanannya, terutama dalam hal menahan masuknya klorida serta mencegah karat pada tulangan, yang dilihat dari laju penetrasi ion klorida, sorptivitas, daya serap air, serta resistivitas listrik. Hasil rangkuman dari berbagai penelitian menunjukkan bahwa fly ash dalam jumlah besar (High Volume Fly Ash) dapat memadatkan struktur beton melalui pembentukan gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan pada umur beton yang lebih tua, yaitu 28 sampai 90 hari, meskipun hal ini juga membuat proses pengerasan pada umur muda, yaitu 3 sampai 14 hari, menjadi lebih lambat. Penambahan bahan halus seperti abu silika atau metakaolin, maupun penggunaan bakteri tertentu, dilaporkan dapat mengurangi kelemahan kekuatan pada umur muda tersebut karena bahan-bahan ini membantu mempercepat pengisian pori pada tahap awal perawatan. Di sisi lain, bentuk fisik bottom ash yang bersudut dan berpori berpeluang dimanfaatkan sebagai pengganti sebagian pasir pada beton bermutu normal hingga tinggi. Secara umum, kajian ini menunjukkan bahwa proporsi campuran FABA yang tepat dapat meningkatkan kekuatan beton sekaligus menurunkan laju masuknya klorida, sehingga beton menjadi lebih tahan terhadap karat tulangan bila digunakan di lingkungan yang keras, seperti kawasan pesisir. Hasil kajian menunjukkan bahwa fly ash lebih dominan berperan sebagai material pozolanik yang memperbaiki mikrostruktur pada umur lanjut, sedangkan bottom ash lebih sesuai digunakan sebagai substitusi agregat halus pada kadar yang terbatas karena sifatnya yang berpori dan menyerap air. Namun, efektivitas kombinasi FABA masih dipengaruhi oleh sumber abu, kehalusan, rasio air-binder, metode curing, serta kondisi lingkungan paparan.

Kata Kunci: Fly Ash (FA), Bottom Ash (BA); Kinerja Mekanis; Penetrasi Klorida (RCPT); Durabilitas Beton; Pembangunan Berkelanjutan.

Pernyataan Pendanaan

Penelitian ini tidak menerima dana khusus, baik dari lembaga pemerintah, perusahaan, maupun organisasi nirlaba. Seluruh proses kajian, mulai dari pengumpulan bahan pustaka hingga penulisan, dikerjakan sendiri oleh penulis sebagai bagian dari tinjauan ilmiah di bidang material teknik sipil.

Ucapan Terima Kasih

Segala bentuk bantuan, motivasi, dan doa dari keluarga serta teman-teman seperjuangan menjadi penyemangat terbesar bagi penulis dalam menyelesaikan karya ini. Di samping itu, rasa hormat yang mendalam penulis sampaikan kepada dosen pembimbing. Terima kasih banyak atas waktu, ilmu, dan kesabaran yang telah diberikan dalam mengarahkan penulis hingga riset ini selesai. Berkat bantuan tersebut, penulis jadi lebih paham cara kerja campuran FABA dalam membuat beton yang kuat dan tahan lama.

Etika Publikasi

Artikel ini merupakan kajian pustaka sehingga tidak melibatkan manusia atau hewan sebagai subjek penelitian. Seluruh sumber yang digunakan telah dicantumkan sesuai kaidah penulisan ilmiah, dan tidak terdapat konflik kepentingan dalam penyusunan tinjauan ini.

Penyataan AI

Penulis menggunakan bantuan perangkat kecerdasan buatan secara terbatas, terutama untuk membantu penyuntingan bahasa dan meningkatkan keterbacaan naskah. Meskipun begitu, seluruh isi, penafsiran, sitasi, dan kesimpulan tetap diperiksa ulang oleh penulis agar sesuai dengan sumber ilmiah yang dirujuk, sehingga keakuratan informasi dapat dipertanggungjawabkan.

1. Pendahuluan

Pertumbuhan pembangunan infrastruktur secara global meningkatkan kebutuhan beton sebagai material konstruksi utama, yang berdampak langsung pada meningkatnya konsumsi semen Portland sebagai bahan pengikat. Semakin banyak proyek konstruksi yang dibangun, semakin besar pula kebutuhan semen sebagai bahan dasar campuran beton. Namun, proses pembuatan semen konvensional menghasilkan emisi gas karbon dioksida (CO₂) dalam jumlah besar ke atmosfer, sehingga industri semen menjadi salah satu penyebab utama pemanasan global.

Sementara itu, Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batu bara terus-menerus menghasilkan limbah padat dalam jumlah besar berupa *fly ash* dan *bottom ash*. Pada awalnya, limbah ini hanya ditangani dengan cara ditimbun di lahan kosong (*landfilling*), padahal cara ini berisiko mencemari udara, tanah, dan air di sekitarnya (Kusdiyono et al., 2017). Perubahan aturan lingkungan di Indonesia, seperti Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021, telah mengeluarkan *Fly Ash* dan *Bottom Ash* dari kategori limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3), sehingga kini keduanya digolongkan sebagai limbah non-B3 (Qolbi et al., 2023; Kusuma, 2024). Perubahan status regulasi tersebut membuka peluang pemanfaatan FABA sebagai material alternatif dalam beton, khususnya untuk mendukung pengurangan limbah industri dan pengembangan material konstruksi yang berkelanjutan (Ayuningtyas et al., 2022).

Pemanfaatan *fly ash* pada beton didasarkan pada ukuran butirannya yang sangat halus serta sifat pozolaniknya yang tinggi karena mengandung banyak senyawa silika aktif (SiO₂) dan alumina (Al₂O₃) (Askarman, 2020; Setiawati, 2018). Sifat pozolanik inilah yang membuat *fly ash* mampu bereaksi dengan kapur sisa hidrasi semen dan membentuk bahan pengikat tambahan pada beton. Sementara itu, *bottom ash* yang mengendap di dasar tungku pembakaran memiliki ukuran partikel yang lebih kasar, berpori, dan bersudut tajam, sehingga berpotensi digunakan sebagai pengganti sebagian pasir alami untuk mengurangi eksploitasi pasir sungai. Melalui penggabungan 20 referensi ilmiah, kajian pustaka ini bertujuan untuk

mengkaji secara menyeluruh pengaruh FABA terhadap dua aspek utama kinerja beton, yaitu kekuatan mekanis jangka panjang serta ketahanan beton saat terpapar lingkungan laut dan cuaca ekstrem.

2. Metodologi Tinjauan Literatur

Studi literatur ini disusun menggunakan metode tinjauan sistematis (*literature review*) melalui analisis deskriptif-komparatif terhadap data sekunder yang bersumber dari 20 artikel jurnal terakreditasi nasional (SINTA) dan internasional bereputasi, seperti MDPI Materials dan *Springer Nature*, yang dibatasi pada publikasi tahun 2015 sampai 2025. Pembatasan rentang tahun ini dilakukan agar data yang dikaji tetap sesuai dengan perkembangan teknologi beton terbaru.

2.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode Tinjauan Literatur Sistematis (*Systematic Literature Review*) untuk mengidentifikasi, menilai, merangkum, dan menafsirkan bukti ilmiah mengenai pengaruh FABA terhadap sifat mekanis dan ketahanan beton keras (*hardened concrete*), khususnya ketahanan terhadap penetrasi klorida. Metode ini dipilih karena dianggap efektif untuk mengurangi bias pribadi peneliti serta kesalahan dalam menafsirkan data teknis. Dengan mengikuti tahapan seleksi dokumen yang jelas dan dapat diulang, hasil kajian ini diharapkan dapat diverifikasi atau dilanjutkan oleh peneliti lain di masa mendatang.

2.2 Strategi Pencarian Literatur

Proses pengumpulan data sekunder dalam studi ini diawali dengan melakukan pencarian dokumen secara komprehensif melalui pangkalan data (*database*) ilmiah digital global maupun nasional yang bereputasi tinggi, seperti *Google Scholar*, *ScienceDirect*, Garuda (Garba Rujukan Digital), MDPI, dan SpringerLink. Rentang waktu publikasi literatur dibatasi pada artikel-artikel terbaru guna memastikan bahwa seluruh data pengujian laboratorium dan teori rekayasa beton yang diekstrak merupakan informasi yang mutakhir.

Proses pencarian mekanis di dalam pangkalan data digital tersebut memaksimalkan penggunaan kombinasi kata kunci (*keywords*) yang diintegrasikan dengan istilah pencarian dirancang dalam dua bahasa, yakni menggunakan frasa Bahasa Indonesia seperti "Abu Terbang", "Abu Dasar", "Kuat Tekan", "Durabilitas" dan "Beton", serta istilah Bahasa Inggris yang meliputi "*High Volume Fly Ash*", "*Bottom Ash*", "*Mechanical Properties*", "*Chloride Penetration*", "*Durability*" dan "*Concrete*".

2.3 Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Untuk memastikan kualitas ilmiah dan tingkat relevansi data yang diperoleh, peneliti menetapkan batasan parameter seleksi yang ketat melalui kriteria inklusi dan eksklusi. Artikel dikategorikan memenuhi kriteria inklusi apabila bersumber dari jurnal ilmiah nasional terakreditasi dalam sistem SINTA atau jurnal internasional bereputasi yang menerapkan sistem *peer-reviewed*. Selain itu, artikel tersebut wajib memiliki fokus kajian utama pada pengujian laboratorium beton keras struktural yang mengintegrasikan FABA serta menyajikan data kuantitatif yang presisi mengenai parameter kekuatan mekanis seperti kuat tekan, kuat lentur, kuat tarik belah, atau modulus elastisitas, serta parameter durabilitas nyata seperti nilai muatan listrik Coulomb (*Rapid Chloride Penetration Test*), indeks sorptivitas, dan korosi tulangan elektrokimia. Dokumen yang tidak menyertakan rujukan pengujian berstandar internasional atau nasional seperti ASTM, SNI, dan AASHTO,

serta dokumen berupa artikel populer, opini, laporan pengabdian masyarakat, atau tesis akademik yang belum diterbitkan secara formal, tidak digunakan oleh penulis. Rentang tahun publikasi juga dibatasi pada 2015-2025 untuk menjaga data tetap mutakhir.

2.4 Proses Seleksi Literatur

Proses pemilihan artikel dilakukan melalui empat tahapan terstruktur untuk menyaring beberapa artikel awal menjadi 20 artikel inti yang berkualitas. Tahap pertama adalah identifikasi, yaitu mengumpulkan semua artikel yang muncul saat peneliti mengetik kata kunci di lima pusat data ilmiah. Tahap kedua adalah penyaringan, di mana peneliti menghapus artikel yang sama agar tidak ganda, lalu memeriksa kesesuaian judul dan abstraknya secara cepat. Tahap ketiga adalah penilaian kelayakan, yaitu peneliti membaca isi artikel secara utuh untuk memastikan dokumen tersebut benar-benar sesuai dengan batasan penelitian. Melalui seleksi yang ketat ini, tahap keempat berhasil menetapkan 20 artikel jurnal final yang siap diambil datanya untuk dianalisis dalam studi literatur ini.

2.5 Teknik Analisis Data

Semua data yang terkumpul dari 20 jurnal tersebut dianalisis menggunakan metode analisis isi campuran (kualitatif dan kuantitatif). Langkah pertama adalah memilah data, yaitu memilih variabel penting seperti persentase campuran FABA, bahan tambahan (seperti metakaolin atau abu silika), lama waktu perawatan beton, serta hasil uji kekuatan dan ketahanan terhadap klorida. Langkah kedua adalah membandingkan hasil antarpelitian untuk mencari tahu takaran yang paling pas dalam penggunaan abu terbang maupun abu dasar, sekaligus mencari penyebab mengapa kekuatan beton sempat menurun pada umur awal. Langkah terakhir adalah menghubungkan bagaimana perubahan struktur mikroskopis beton akibat terbentuknya gel pengikat baru dapat membuat beton lebih kedap air dan lebih tahan terhadap karat. Seluruh hasil analisis ini ditulis secara rapi dan dilengkapi dengan tabel ringkasan agar kesimpulan penelitian menjadi lebih jelas.

3. Sintesis Literatur dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Limbah *Fly Ash* dan *Bottom Ash* Sebagai Material Beton.

Hasil analisis menunjukkan bahwa abu terbang (*fly ash*) dan abu dasar (*bottom ash*) memiliki bentuk fisik dan kandungan kimia yang sangat berbeda, sehingga fungsi keduanya dalam campuran beton tidak dapat disamakan (Solikin & Ariska, 2023). *Fly ash* memiliki butiran yang sangat halus, seperti debu, dan kaya akan silika serta alumina aktif. Berdasarkan kadar kapurnya, limbah ini dibagi menjadi dua jenis, yaitu Kelas F yang rendah kalsium dan Kelas C yang tinggi kalsium (Askarman, 2020). Karena bentuk partikelnya bulat sempurna seperti bola mikroskopis, *fly ash* mampu memberikan efek pelumasan alami saat adonan beton masih basah. Efek ini membuat adukan beton menjadi lebih encer, licin, dan mudah dituangkan ke dalam cetakan tanpa perlu menambahkan banyak air (Ayuningtyas et al., 2023). Oleh karena itu, dalam campuran beton, *fly ash* difungsikan sebagai bahan pengikat untuk menggantikan sebagian porsi semen (Qolbi et al., 2023).

Sebaliknya, *bottom ash* memiliki ukuran butiran yang jauh lebih kasar, bersudut tajam, dan diperoleh dari dasar tungku pembakaran. Ukurannya yang mirip dengan butiran pasir sedang membuat *bottom ash* sangat cocok digunakan sebagai material pengganti pasir alami, bukan pengganti semen (Samawi et al., 2024). *Bottom ash* dapat memberikan dua efek yang saling berlawanan. Pada kadar rendah, tekstur kasar dan bentuk bersudut dapat

meningkatkan *mechanical interlocking* dengan pasta semen. Namun, pada kadar tinggi, porositas internal dan daya serap air yang besar dapat meningkatkan kebutuhan air, menurunkan *workability*, memperlemah ITZ, dan meningkatkan risiko terbentuknya pori kapiler. Oleh karena itu, penggunaan bottom ash perlu dikontrol melalui gradasi, kadar substitusi, dan penyesuaian air atau *admixture*. Hal ini membuat adonan beton segar lebih cepat mengental, menjadi kaku, dan lebih sulit untuk diratakan. Perbedaan karakter yang mencolok inilah yang nantinya akan memengaruhi kekuatan fisik dan kerapatan pori-pori dalam beton saat sudah mengeras.

3.2 Pengaruh *Fly Ash* dan *Bottom Ash* terhadap Kuat Tekan Beton

Pengaruh *fly ash* terhadap kuat tekan terutama berkaitan dengan reaksi pozzolanik dan pembentukan C-S-H sekunder pada umur lanjut. Sebaliknya, pengaruh *bottom ash* lebih banyak ditentukan oleh karakteristik fisik sebagai agregat halus, seperti bentuk partikel, porositas, daya serap air, dan kualitas ikatan dengan pasta semen. Pada umur pengujian awal antara 3 hingga 14 hari, beton yang dicampur *fly ash* umumnya mengalami keterlambatan pengerasan dan memiliki kekuatan tekan yang lebih rendah dibandingkan beton normal, karena butiran *fly ash* belum bereaksi secara kimiawi pada fase awal dan baru bertindak sebagai bahan pengisi rongga (*filler*) (Solikin & Ariska, 2023; Sandra et al., 2026). Kondisi ini berubah pada umur lanjut antara 28 hingga 90 hari, di mana senyawa silika aktif dari *fly ash* mulai bereaksi sekunder dengan kalsium hidroksida [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] sisa hidrasi semen. Reaksi pozzolanik jangka panjang ini menghasilkan gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) baru yang memperbaiki kepadatan struktur dalam beton (Sandra et al., 2026).

Berdasarkan literatur yang dikaji, pengaruh FA dan BA terhadap kuat tekan dapat dikelompokkan menjadi tiga pola umum: pada kadar rendah, kekuatan cenderung dipertahankan mendekati beton normal; pada kadar sedang, kekuatan justru dapat meningkat pada umur lanjut seiring matangnya reaksi pozzolanik; sedangkan pada kadar tinggi, kuat tekan cenderung menurun akibat efek dilusi semen oleh *fly ash* dan peningkatan porositas oleh bottom ash yang belum dihaluskan secara optimal. Kadar optimum *bottom ash* sebagai substitusi agregat halus cenderung berada pada kadar rendah hingga sedang, sedangkan kadar optimum *fly ash* sebagai substitusi semen sangat bergantung pada kelas *fly ash*, rasio air-binder, umur pengujian, serta penggunaan bahan tambah lainnya (Fauzi & Lestari, 2020). Karakteristik *fly ash* dan *bottom ash* juga sangat dipengaruhi oleh sumber PLTU, komposisi kimia, kehalusan, *loss on ignition* (LOI), dan metode *mix design*, sehingga penetapan kadar optimum sebaiknya mengacu pada karakterisasi material pada masing-masing studi, bukan disamaratakan untuk semua kondisi. Untuk beton berkadar *fly ash* tinggi (*High Volume Fly Ash* hingga 50%), kelemahan kekuatan awal yang dilaporkan dapat diatasi melalui penambahan 10% *silica fume* (Solikin & Ariska, 2023) atau pemanfaatan bakteri *Bacillus safensis* yang mampu mempercepat pembentukan kristal penutup pori (Amini et al., 2025).

3.3 Pengaruh *Fly Ash* dan *Bottom Ash* terhadap Kuat Tarik Belah, Kuat Lentur, dan Modulus Elastisitas

Sifat mekanis beton FABA, selain kuat tekan, menunjukkan pola yang berbeda, sehingga perlu dibahas secara terpisah. Penguatan zona batas antara agregat dan pasta semen (*Interfacial Transition Zone*) oleh gel pozzolanik membuat nilai kuat tarik belah beton FABA cenderung tumbuh selaras dengan nilai kuat tekannya (Untu et al., 2015). Dalam hal campuran, penggunaan *bottom ash* dengan persentase yang sangat rendah dan tepat sebesar 9% mampu menciptakan gaya saling mengunci antar-butiran yang kokoh, sehingga beton menjadi lebih tangguh dalam menahan gaya belah atau tarikan (Dewi &

Prasetyo, 2021). Sebaliknya, penggunaan bottom ash yang berlebihan justru dapat menimbulkan cacat struktur karena partikel abu kasar yang tidak dihaluskan mengandung banyak rongga udara, sehingga mempercepat munculnya retak pada beton.

Pada aspek kuat lentur, penggunaan fly ash sebanyak 15% sebagai bahan pengganti terbukti membuat balok beton memiliki daya lentur yang lebih tinggi pada umur 90 hari dibandingkan beton biasa (Sandra et al., 2026). Temuan tersebut menunjukkan potensi penggunaan *fly ash* pada elemen beton yang memerlukan ketahanan lentur. Namun, penerapannya pada perkerasan kaku masih perlu diverifikasi melalui pengujian kuat lentur, pengujian abrasi, serta durabilitas jangka panjang. Sementara itu, tingkat kekakuan beton dalam menahan perubahan bentuk (modulus elastisitas) sangat dipengaruhi oleh metode perancangan campuran yang digunakan, baik metode ACI maupun DOE, karena perbedaan takaran air dan semen pada kedua metode tersebut memengaruhi kerapatan pori serta kekakuan akhir beton setelah mengeras (Abdullah et al., 2022). Dengan demikian, ketiga parameter ini tidak dapat dipandang secara terpisah dari kuat tekan maupun dari kadar dan gradasi FABA yang digunakan, melainkan saling terkait dalam satu sistem kinerja mekanis beton secara menyeluruh. Konsistensi hubungan ini menjadi dasar penting bagi penelitian ini untuk mengevaluasi kuat tarik belah, kuat lentur, dan potensinya terhadap kekakuan beton FABA secara terpadu, sekaligus mengaitkannya dengan kinerja durabilitas melalui pengujian RCPT, guna memperoleh gambaran komposisi optimum yang seimbang antara kekuatan mekanis dan ketahanan jangka panjang.

3.4 Pengaruh *Fly Ash* dan *Bottom Ash* terhadap Absorpsi, Sorptivitas, dan Penetrasi Klorida

Ketahanan jangka panjang beton mengeras meningkat berkat efek pengisi mikro (*filler effect*) dari butiran halus *fly ash*. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* pada kadar tertentu dapat menurunkan absorpsi dan sorptivitas melalui perbaikan struktur pori. Namun, efektivitas tersebut tetap dipengaruhi oleh kadar substitusi, umur *curing*, rasio air-binder, serta karakteristik abu. Penurunan serapan air ini terjadi secara bertahap seiring bertambahnya umur perawatan beton, di mana pengisian pori mikro oleh *fly ash* secara konsisten mengecilkan ukuran pori-pori besar (makropori) menjadi pori-pori halus (mikropori) yang tidak saling terhubung (Kusuma, 2024). Selain tangguh menahan air, pengujian ketahanan terhadap pembekuan-pencairan (*freeze-thaw*) sebanyak 150 siklus membuktikan bahwa beton FABA stabil, rongga internalnya yang tertutup mampu meredam tekanan kristalisasi es tanpa membuat permukaan beton pecah, rontok, ataupun kehilangan berat strukturnya (Malaiškienė & Vaičienė, 2024).

Kepadatan mikrostruktur tersebut divalidasi secara lebih akurat melalui pengujian *Rapid Chloride Penetration Test* (RCPT), di mana beton yang diberi campuran pozolanik mampu menekan aliran arus listrik hingga berada di bawah angka 1000 Coulomb, yang menandakan ketahanan resapan klorida berada pada kategori "Sangat Rendah" (Deni et al., 2023). Melalui pendekatan matematis Hukum Fick II untuk memproyeksikan difusi jangka panjang, nilai koefisien difusi klorida dapat diperkecil seiring dengan matangnya reaksi kimia fly ash pada umur lanjut (Hardianti et al., 2017), yang menegaskan bahwa penataan ulang struktur pori oleh FABA tidak hanya membatasi pergerakan cairan secara fisik melalui gaya kapiler, tetapi juga menciptakan hambatan elektrokimia yang mempersulit ion-ion agresif dari luar untuk menembus selimut beton dan mendekati

tulangan baja di dalamnya (Sandra et al., 2026; Solikin et al., 2022). Perlu digarisbawahi bahwa RCPT sendiri tidak mengukur jumlah ion klorida yang benar-benar mencapai tulangan, melainkan mengukur muatan listrik yang melewati beton, sehingga nilainya dipengaruhi oleh konektivitas pori, resistivitas beton, konduktivitas larutan pori, suhu, dan jenis *binder*; oleh karena itu, evaluasi risiko korosi tulangan secara menyeluruh sebaiknya tetap dikombinasikan dengan pengujian *half-cell potential*, resistivitas listrik, dan pengamatan mikrostruktur.

Meskipun demikian, masih terdapat *research gap* atau celah penelitian yang nyata pada aspek durabilitas ini yang belum sepenuhnya terjawab oleh literatur terdahulu. Sebagian besar penelitian yang ada saat ini hanya menguji penetrasi klorida secara instan lewat simulasi arus listrik laboratorium (seperti uji RCPT), namun masih sangat jarang ditemukan penelitian yang memetakan profil difusi klorida alami pada beton kombinasi ganda FABA yang ditempatkan langsung di bawah siklus cuaca pasang-surut air laut (*tidal zone*) tropis dalam jangka panjang (Triwidinata, 2017). Ketiadaan data lapangan jangka panjang ini menjadi hambatan besar bagi para perancang struktur untuk memvalidasi apakah hambatan elektrokimia dan kestabilan pori beton FABA tetap kokoh ketika berhadapan langsung dengan fluktuasi suhu udara yang ekstrem, penguapan tinggi, dan paparan garam dunia nyata secara terus-menerus.

3.5 Implikasi terhadap Korosi Tulangan dan Lingkungan Agresif

Kemampuan beton FABA dalam menekan laju penetrasi ion klorida berkontribusi terhadap perlindungan jangka panjang elemen tulangan baja di dalamnya. Pada beton konvensional yang ditempatkan di lingkungan pantai atau laut, porositas yang tinggi mempermudah ion klorida merembes hingga merusak lapisan pelindung pasif pada permukaan tulangan, memicu korosi lokal yang membuat tulangan mengecil, rapuh, serta menimbulkan tekanan internal yang berpotensi menyebabkan retak pada beton (Fauzi & Lestari, 2020). Pada beton FABA, perlindungan terhadap korosi tulangan dapat dijelaskan melalui tiga mekanisme yang saling melengkapi. Pertama, *physical barrier*: pori beton yang lebih rapat akibat efek *filler* dan reaksi pozzolanik *fly ash* membuat ion klorida lebih sulit menembus selimut beton (Sandra et al., 2026). Kedua, *chemical binding*: sebagian ion klorida yang masuk dapat terikat pada fase alumina hasil reaksi *fly ash*, sehingga klorida tersebut terjebak dan tidak bebas bergerak menuju permukaan tulangan (Hardianti et al., 2017; Deni et al., 2023). Ketiga, *electrical resistance*: peningkatan resistivitas beton akibat mikrostruktur yang lebih rapat dapat menurunkan laju arus korosi elektrokimia, sehingga risiko depasivasi tulangan akibat penetrasi klorida dapat ditekan.

Melalui kombinasi ketiga mekanisme tersebut, tulangan baja di dalam beton FABA berpotensi tetap berada dalam kondisi pasif untuk periode yang lebih lama dibandingkan dengan beton konvensional. Karakteristik ini juga relevan pada lingkungan agresif lain, seperti tanah dengan tingkat keasaman tinggi maupun kawasan industri yang terpapar zat kimia, meskipun mekanisme dan besaran pengaruhnya pada kondisi tersebut memerlukan kajian lebih lanjut.

3.6 Research Gap dan Arah Penelitian Selanjutnya

Meskipun hasil tinjauan terhadap 20 jurnal ilmiah ini memberikan sejumlah temuan yang konsisten, masih terdapat beberapa celah penelitian (*research gap*) yang dapat diidentifikasi. Pertama, belum ada konsensus mengenai kadar optimum kombinasi *fly ash*

dan *bottom ash*, karena karakteristik material sangat bergantung pada sumber abu. Kedua, studi jangka panjang pada lingkungan laut tropis masih terbatas, sementara sebagian besar pengujian dilakukan pada skala laboratorium dan dalam jangka waktu yang singkat. Ketiga, hubungan antara karakteristik pori, hasil RCPT, resistivitas, dan laju korosi belum banyak dianalisis secara terpadu. Keempat, pengaruh *bottom ash* terhadap *workability* dan kebutuhan air masih perlu dikontrol lebih ketat dalam desain campuran (*mix design*). Kelima, evaluasi *Life Cycle Assessment* (LCA) masih jarang dikaitkan secara langsung dengan performa mekanis dan durabilitas beton FABA. Celah utama bukan hanya kurangnya jumlah penelitian FABA, tetapi juga belum terintegrasinya evaluasi mekanis, transpor ion, elektrokimia, dan mikrostruktur dalam satu kerangka analisis. Padahal, hubungan antara porositas, RCPT, resistivitas, *half-cell potential*, dan SEM diperlukan untuk menjelaskan mekanisme ketahanan korosi secara lebih menyeluruh.

Oleh karena itu, arah pengembangan penelitian di masa depan harus difokuskan pada beberapa aspek utama, seperti pembuatan standar desain campuran (*mix design*) kombinasi ganda FABA untuk beton mutu tinggi struktural. Selain itu, penggunaan teknologi murah dan ramah lingkungan, seperti rekayasa bakteri untuk mengatasi lambatnya pengerasan beton pada umur awal, perlu terus diperluas (Amini dkk., 2025). Akhirnya, penelitian masa depan wajib menyertakan pengujian skala penuh di lapangan langsung serta analisis penilaian siklus hidup *Life Cycle Assessment* (LCA) guna membuktikan nilai penghematan biaya ekonomi dan penurunan emisi karbon secara nyata demi mendukung pemanfaatan material bangunan hijau yang berkelanjutan (Ayuningtyas dkk., 2022; Qolbi dkk., 2023).

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil kajian terhadap 20 artikel, penggunaan *fly ash* dan *bottom ash* berpengaruh terhadap karakteristik mekanis dan durabilitas beton, tetapi keduanya tidak dapat diperlakukan sebagai material yang setara atau saling menggantikan. *Fly ash* berperan sebagai material pozolanik yang memperbaiki mikrostruktur beton melalui reaksi kimia pada umur lanjut, sedangkan *bottom ash* terutama berfungsi sebagai substitusi agregat halus yang bekerja melalui mekanisme fisik, seperti pengisian rongga dan perbaikan gradasi butiran, pada kadar tertentu. Pada umur awal, penggunaan *fly ash* cenderung menurunkan kuat tekan akibat lambatnya reaksi pozzolanik, tetapi pada umur 28 hingga 90 hari berpotensi meningkatkan kekuatan melalui pembentukan gel C-S-H sekunder. Perbedaan mekanisme kerja inilah yang menjadi alasan utama mengapa kedua material tersebut perlu dikaji dan dirancang secara terpisah, bukan digeneralisasi sebagai satu kelompok "abu FABA" yang berperilaku sama.

Dari aspek durabilitas, *fly ash* dan *bottom ash* berpotensi menekan daya serap air, sorptivitas, dan penetrasi ion klorida apabila digunakan dalam proporsi yang sesuai, sehingga secara tidak langsung turut memperlambat laju korosi pada tulangan baja dalam beton. Manfaat tersebut terjadi melalui tiga mekanisme yang saling mendukung, yaitu penutupan pori secara fisik, pengikatan sebagian ion klorida secara kimia, serta peningkatan resistivitas listrik beton. Meski demikian, besar-kecilnya manfaat ini tetap bergantung pada karakteristik abu yang digunakan, kadar substitusi, rasio air terhadap bahan pengikat, metode perawatan (*curing*), serta kondisi lingkungan tempat beton diaplikasikan, sehingga hasil dari satu penelitian tidak dapat digeneralisasi begitu saja pada kasus lain. Dengan kata lain, penerapan FABA yang optimal menuntut perancangan yang spesifik terhadap karakteristik masing-masing material, bukan pendekatan satu formula untuk semua kondisi.

Berdasarkan berbagai temuan tersebut, terdapat sejumlah aspek yang perlu dikaji lebih lanjut dalam penelitian mendatang. Studi mengenai kombinasi ganda *fly ash* dan *bottom ash* dalam satu adonan beton perlu ditingkatkan untuk memperoleh gambaran yang komprehensif mengenai interaksi kedua material tersebut, mengingat keduanya bekerja melalui jalur yang berbeda namun saling memengaruhi hasil akhir. Riset ke depan juga hendaknya mengintegrasikan analisis kelayakan ekonomi dan lingkungan, seperti perhitungan biaya produksi dan penilaian siklus hidup (*Life Cycle Assessment*), guna memastikan efektivitas FABA secara teknis sekaligus nilai komersialnya dalam industri konstruksi.

5. Referensi

- Abdullah, N., Ranian, C., Hardi, I., Kurniawan, K., & Syauki, M. (2022). Hubungan Kuat Tekan, Tarik Belah, dan Tarik Lentur Beton dengan Bahan Tambah akibat Penggunaan Metode Perencanaan Campuran yang Berbeda. *Jurnal Teknik Sipil*, 11(2), 89–94. <https://doi.org/10.24815/jts.v11i2.25820>
- Amini, I. N., Syah, D. F., Setiamarga, D. H. E., Basoeki, M., Danardi, L., Laory, I., Anda, M., Maulana, M. A., & Wulandari, M. (2025). Performance and Durability of High-Volume Fly Ash Concrete Incorporating *Bacillus safensis* : A Comparative Study of Class C and Class F Fly Ash. *Journal of Advanced Civil and Environmental Engineering*, 8(2), 8–21.
- Askarman, A. (2020). Kajian Pengaruh Penggunaan Fly Ash Amp Dan Fly Ash Batu Bara Terhadap Kuat Tekan Dan Kuat Lentur Perkerasan Kaku (Rigid Pavement).
- Ayuningtyas, U., Ach Firdaus, D., Riset Sistem Produksi Berkelanjutan dan Penilaian Daur Hidup, P., Riset dan Inovasi Nasional Kawasan Puspiptek, B., & Selatan, T. (2023). Fly Ash Dan Bottom Ash Sebagai Material Infrastruktur Untuk Mendukung Pembangunan Yang Berkelanjutan. *Seminar Nasional Penelitian Dan Pengabdian Pada Masyarakat 2023*, 26–27, 47–52. <https://buanakonstruksi.com/jasa/harga->
- Ayuningtyas, U., Susila, I. M. A. D., Sihombing, A. L. S., Sasongko, N. A., Anggraeni, P., Nugroho, T. P. A., & Darmayanti, N. T. E. (2022). Material Konstruksi Ramah Lingkungan Dalam Rangka Mendukung Kriteria Bangunan Hijau. *Seminar Nasional Penelitian Dan Pengabdian Pada Masyarakat 2022*, 51–56.
- Deni, D. P., Alfianarrochmah, 'Ilma, & Kurnianingsih, O. (2023). Penetrasi dan Sorptivitas Klorida Beton Mutu Tinggi Memadat Mandiri dengan Variasi Substitusi Metakaolin. *Jurnal Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 8(02), 115–126. <https://doi.org/10.29244/jsil.8.02.115-126>
- Dewi, S. U., & Prasetyo, F. (2021). Analisa Penambahan Bottom Ash Terhadap Kuat Tekan Dan Kuat Tarik Belah Beton. *JICE (Journal of Infrastructural in Civil Engineering)*, 2(02), 31. <https://doi.org/10.33365/jice.v2i02.1307>
- Fauzi, M., & Lestari, D. A. (2020). Analisis Kuat Lentur Campuran Beton Menggunakan Limbah B3 Sebagai Bahan Adiktif. *Pilar*, 15(02), 58–63. <https://www.jurnal.polsri.ac.id/index.php/pilar/article/view/2186>
- Hardianti, H., Kristiawan, S. A., & Wibowo. (2017). Pengaruh Konsentrasi Klorida Terhadap Laju Penetrasi Ion Klorida Ke Dalam Beton High Volume Fly Ash-Self Compacting

- Concrete (HVFA-SCC). *Matriks Teknik Sipil*, 5(September), 974–980.
- Kusdiyono, Supriyadi, & Wahyono, H. L. (2017). PENGARUH PENAMBAHAN FLY ASH DAN BOTTOM ASH PADA PEMBUATAN BETON MUTU f'_{c} 20 Mpa DALAM. 2006.
- Kusuma, A. M. (2024). J-Sipil: Jurnal Teknologi Dan Ilmiah Teknik Sipil Dan Sains journal.univgresik.ac.id/index.php/j-sipil/index 13 |. *J-Sipil*, 1(1), 13–23. <https://journal.univgresik.ac.id/index.php/j-sipil/index>
- Malaiškienė, J., & Vaičienė, M. (2024). The Influence of Silica Fly Ash and Wood Bottom Ash on Cement Hydration and Durability of Concrete. *Materials*, 17(16). <https://doi.org/10.3390/ma17164031>
- Qolbi, G. N., Gunawan, B., & Sugandi, Y. S. (2023). Alternatif Kebijakan untuk Fly Ash dan Bottom Ash (Studi Kasus: PP No. 22 Tahun 2021). *SCIENTIFIC JOURNAL OF REFLECTION : Economic, Accounting, Management and Business*, 6(3), 502–512. <https://doi.org/10.37481/sjr.v6i3.691>
- Samawi, N. A., Saputro, Y. A., & Hidayati, N. (2024). Analisis Mutu Beton Berbahan Faba (Fly Ash Bottom Ash) Sebagai Pengganti Agregat Halus Dengan Mengacu Proporsi Campuran Pada Analisa Harga Satuan Pekerja. *Jurnal Civil Engineering Study*, 4(1), 66–77.
- Sandra, N., Damanik, N., Caronge, M. A., & Soleh, M. (2026). Mechanical performance and corrosion resistance of concrete with partial fly ash substitution. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 11, 87
- Setiawati, M. (2018). Fly Ash Sebagai Bahan Pengganti Semen Pada Beton. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi 2018*, 1–8.
- Solikin, M., & Ariska, A. (2023). Pengaruh Penggunaan Silica fume Terhadap Sifat Mekanis Beton Mutu Tinggi High Volume Fly Ash (HVFA). *JRST (Jurnal Riset Sains dan Teknologi)*, 7(2), 151. <https://doi.org/10.30595/jrst.v7i2.16582>
- Solikin, M., Setiawan, Nurhasan, & Prayogi. (2022). Analisis penetrasi ion klorida pada beton high volume fly ash mutu tinggi dengan variasi kekuatan tekannya yang tinggi sehingga dimensi dari elemen struktur dapat menjadi kedalam campuran beton. 12(2), 425–434.
- Triwidinata. (2017). Pengaruh Bottom Ash sebagai Bahan Pengganti Sejumlah Pasir terhadap Kuat Tekan, Kuat Tarik Lentur dan Modulus Elastisitas pada Beton Mutu Tinggi. 1–59.
- Untu, G. E., Kumaat, & Windah. (2015). Variasi Kuat Tekan Beton. *Jurnal Sipil Statistik*, 3(10), 703–708.