

Multi-Criteria Optimization of Rice Husk Ash Mortar Using Entropy–TOPSIS

Sugiarto^{*1}, Angga Setiadi², Samsul Arifin³, Sofyan Dwi Laksono⁴

Email: sugiarto@stekom.a.cid; angga.setiyadi2@stekom.ac.id; samsul.arifin2@stekom.ac.id; sofyan.dwi2@stekom.ac.id

Orcid: <https://orcid.org/0009-0004-6945-5772> ⁽¹⁾; <https://orcid.org/0009-0002-4077-8995> ⁽³⁾; <https://orcid.org/0009-0005-0439-2114> ⁽⁴⁾

^{1,2,3,4}Universitas Sains dan Teknologi Komputer, Semarang, Indonesia

^{*}Corresponding Author

Article Information	Abstract
Keywords: Entropy; mortar optimization; multi-criteria decision making; rice husk ash; TOPSIS.	<i>The use of supplementary cementitious materials is widely investigated as a strategy for reducing Portland-cement demand; however, mixture selection should account for mechanical, physical, and economic criteria simultaneously. This study evaluated five rice husk ash (RHA) substitution levels (0%, 5%, 10%, 15%, and 20%) using 28-day compressive strength, water absorption, and estimated direct material cost. Entropy weighting was used to quantify the data-driven discriminating power of the three criteria, and TOPSIS was used to compare the alternatives, followed by sensitivity analysis. Among the investigated substitution levels, M10 (10% RHA) produced the highest mean compressive strength (24.60 MPa), the lowest mean water absorption (6.30%), and a 3.91% lower estimated direct material cost than the control. The Entropy-derived weights were 45.49% for water absorption, 43.45% for compressive strength, and 11.06% for cost; these values reflect variability in the five-alternative dataset rather than engineering importance. TOPSIS ranked M10 first (closeness coefficient = 0.9595). A threshold sensitivity analysis showed that M15 overtook M10 only when the cost weight increased to approximately 60.3%, while the remaining weight was distributed between the two technical criteria in their original Entropy proportion. The result therefore identifies M10 as the best-performing mixture among the five investigated substitution levels, not as a global optimum. All compressive-strength and water-absorption values reported in this paper originate from the laboratory tests described in the study.</i>

	Abstrak
Kata Kunci: abu sekam padi; Entropy; mortar; TOPSIS; optimasi multikriteria	Penggunaan material substitusi semen banyak diteliti sebagai salah satu strategi untuk mengurangi kebutuhan semen Portland; namun, pemilihan campuran perlu mempertimbangkan kriteria mekanis, fisik, dan ekonomi secara simultan. Penelitian ini mengevaluasi lima tingkat substitusi abu sekam padi (ASP), yaitu 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%, berdasarkan kuat tekan umur 28 hari, serapan air, dan estimasi biaya material langsung. Pembobotan Entropy digunakan untuk mengukur daya pembeda berbasis data dari ketiga kriteria, sedangkan TOPSIS digunakan untuk membandingkan alternatif dan dilanjutkan dengan analisis sensitivitas. Di antara tingkat substitusi yang diuji, M10 (10% ASP) menghasilkan kuat tekan rata-rata tertinggi (24,60 MPa), serapan air rata-rata terendah (6,30%), serta estimasi biaya material langsung 3,91% lebih rendah daripada kontrol. Bobot hasil Entropy adalah 45,49% untuk serapan air, 43,45% untuk kuat tekan, dan 11,06% untuk biaya; bobot tersebut mencerminkan variasi informasi dalam dataset lima alternatif dan bukan tingkat kepentingan rekayasa. TOPSIS menempatkan M10 pada peringkat pertama (koefisien kedekatan = 0,9595). Analisis sensitivitas berbasis ambang menunjukkan bahwa M15 baru melampaui M10 ketika bobot biaya meningkat menjadi sekitar 60,3%, dengan sisa bobot dibagi pada dua kriteria teknis mengikuti proporsi Entropy awal.



Dengan demikian, M10 diidentifikasi sebagai campuran berkinerja terbaik di antara lima tingkat substitusi yang diteliti, bukan sebagai optimum global. Seluruh nilai kuat tekan dan serapan air yang dilaporkan berasal dari pengujian laboratorium dalam penelitian ini.

I. PENDAHULUAN

Mortar merupakan material berbasis semen yang banyak digunakan pada pekerjaan pasangan dinding, plesteran, perbaikan permukaan, dan berbagai komponen nonstruktural bangunan. Kebutuhan mortar terus meningkat sejalan dengan pertumbuhan pembangunan perumahan dan infrastruktur, sehingga konsumsi semen sebagai bahan pengikat utamanya juga cenderung bertambah. Kondisi tersebut menimbulkan persoalan karena produksi semen memerlukan bahan baku dan energi dalam jumlah besar serta berkontribusi terhadap beban lingkungan industri konstruksi. Upaya menurunkan penggunaan semen dalam campuran mortar karena itu menjadi bagian penting dari pengembangan material konstruksi yang lebih berkelanjutan. Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan tanpa mengubah proses produksi secara mendasar ialah mengganti sebagian semen dengan bahan tambahan mineral yang berasal dari residu pertanian atau industri.

Abu sekam padi memiliki potensi sebagai bahan substitusi parsial semen karena berasal dari residu pembakaran sekam yang tersedia dalam jumlah cukup besar di berbagai wilayah penghasil padi. Material ini dapat mengandung silika reaktif apabila sekam dibakar dan diolah pada kondisi yang sesuai, meskipun karakteristik akhirnya sangat dipengaruhi oleh temperatur pembakaran, kadar karbon, tingkat kristalinitas, serta kehalusan partikel. Silika amorf dalam abu sekam padi dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen dan membentuk produk pengikat tambahan yang memperbaiki struktur matriks. Pada saat yang sama, partikel halusny dapat mengisi rongga di antara butiran semen dan agregat halus [1]. menunjukkan bahwa abu sekam padi berkualitas baik dapat berfungsi sebagai bahan tambahan pada mortar serta memberikan kinerja kekuatan dan durabilitas yang sebanding dengan beberapa bahan pozzolan konvensional. Potensi tersebut menempatkan abu sekam padi sebagai salah satu alternatif untuk mengurangi konsumsi semen sekaligus meningkatkan nilai guna limbah pertanian.

Pemanfaatan abu sekam padi tidak serta-merta meningkatkan kinerja mortar atau beton pada seluruh kadar substitusi, karena respons material ditentukan oleh interaksi antara ukuran partikel, kondisi pembakaran, rasio air-binder, umur perawatan, dan proporsi penggantian semen [2], [3]. Ukuran partikel yang lebih halus umumnya meningkatkan kuat tekan dan menurunkan permeabilitas melalui efek filler dan peningkatan reaktivitas pozzolanik, tetapi pada saat yang sama dapat menurunkan slump atau workability karena luas permukaan dan kebutuhan air yang lebih besar [4], [5]. Pengaruh kondisi pembakaran juga tidak linier: peningkatan temperatur

kalsinasi dapat terlebih dahulu memperbaiki kekuatan, lalu menurunkannya kembali, sedangkan pembakaran terkontrol sekitar 600–650°C cenderung menghasilkan silika amorf yang lebih reaktif dan kadar karbon yang lebih rendah [3], [4].

Kuat tekan memang sering dipakai sebagai indikator utama pemilihan komposisi, tetapi campuran dengan kuat tekan tertinggi belum tentu memberikan serapan air, permeabilitas klorida, atau efisiensi biaya yang terbaik [6], [7]. Pada mortar berbasis RHA, peningkatan kadar substitusi dapat sekaligus mengubah kuat tekan, serapan air, permeabilitas klorida, dan ruang pori permeabel, dengan hubungan kuat tekan terhadap parameter transport air yang bersifat non-linier [7]. Hal ini terjadi karena pada kadar tertentu reaksi pozzolanik dan pengisian pori memampatkan matriks, sedangkan pada kadar yang terlalu tinggi efek dilusi, kebutuhan air yang meningkat, atau gangguan hidrasi mulai mendominasi [4].

Oleh karena itu, komposisi optimum berdasarkan kuat tekan dapat berbeda dari komposisi terbaik berdasarkan serapan air; misalnya, pada mortar MSWIA, sifat mekanis terbaik dicapai pada 10% RHA, sedangkan serapan air terus menurun hingga 15% RHA [8]. Dengan demikian, penentuan kadar substitusi abu sekam padi lebih tepat diposisikan sebagai persoalan keputusan multi-kriteria yang menyeimbangkan kekuatan, durabilitas, workability, dan biaya, bukan sebagai asumsi bahwa semakin banyak RHA selalu menghasilkan mortar yang semakin baik [5].

Pemilihan berdasarkan satu parameter dapat menimbulkan keputusan yang kurang seimbang karena sifat mortar tidak hanya ditentukan oleh kekuatan mekanis. Serapan air perlu diperhitungkan karena berkaitan dengan struktur pori terbuka dan kemampuan cairan memasuki matriks, sedangkan biaya produksi menentukan kelayakan penerapan campuran dalam pekerjaan konstruksi [9], [10]. Penurunan konsumsi semen memang dapat mengurangi komponen biaya bahan pengikat, tetapi proses pembakaran, penggilingan, penyaringan, dan pengangkutan abu sekam padi juga dapat menambah biaya pengolahan. Oleh sebab itu, komposisi yang menggunakan kadar abu terbesar belum tentu menjadi alternatif paling ekonomis apabila material memerlukan pemrosesan tambahan. Ketiadaan prosedur yang mengintegrasikan kuat tekan, serapan air, dan biaya dapat menyebabkan pemilihan campuran bergantung pada penilaian intuitif peneliti. Pendekatan semacam itu juga menyulitkan perbandingan antaralternatif ketika setiap kriteria menggunakan satuan, rentang nilai, dan arah optimasi yang berbeda.

Multi-Criteria Decision Making dapat digunakan untuk menangani persoalan pemilihan ketika sejumlah alternatif harus dinilai berdasarkan beberapa indikator yang saling berkonflik. Dalam konteks material konstruksi, [11] mengembangkan pendekatan gabungan AHP, TOPSIS, dan Entropy untuk mengevaluasi serta memeringkatkan material struktural berdasarkan pertimbangan keberlanjutan sepanjang siklus hidupnya. Pendekatan tersebut memperlihatkan bahwa metode

keputusan multikriteria dapat memperluas evaluasi material dari sekadar perbandingan satu sifat teknis menjadi penilaian yang mempertimbangkan sejumlah dimensi. Metode Entropy dapat menentukan bobot kriteria secara objektif berdasarkan tingkat keragaman informasi pada matriks keputusan, sehingga kriteria yang lebih mampu membedakan alternatif memperoleh bobot lebih besar. TOPSIS kemudian menentukan peringkat alternatif melalui kedekatannya terhadap solusi ideal positif dan jaraknya dari solusi ideal negatif. Kombinasi keduanya mengurangi ketergantungan pada penetapan bobot subjektif dan menghasilkan prosedur pemilihan yang lebih transparan.

Penerapan Entropy–TOPSIS juga telah digunakan pada persoalan konstruksi yang melibatkan banyak indikator [12], [13], [14], [15], [16]. [17] menerapkan pembobotan Entropy dan TOPSIS untuk mengidentifikasi serta memeringkatkan faktor utama dalam implementasi konstruksi ramping berkelanjutan. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa Entropy dapat mengurangi pengaruh subjektivitas dalam pembobotan, sedangkan koefisien kedekatan TOPSIS menyediakan dasar kuantitatif bagi pemeringkatan alternatif. Analisis sensitivitas terhadap perubahan bobot selanjutnya dapat digunakan untuk menilai apakah urutan alternatif tetap stabil ketika tingkat kepentingan kriteria berubah.

Meskipun pendekatan keputusan multikriteria telah diterapkan dalam pemilihan material dan pengelolaan konstruksi, integrasinya dengan eksperimen mortar abu sekam padi masih memerlukan pengembangan yang lebih spesifik. Penelitian terdahulu telah menjelaskan pengaruh abu sekam padi terhadap kekuatan, mikrostruktur, serapan air, dan permeabilitas, tetapi hasil pengujian tersebut tidak selalu diolah menjadi satu ukuran preferensi yang memperlihatkan kompromi terbaik antarindikator. Selain itu, penggunaan bobot yang sepenuhnya ditentukan oleh penilaian peneliti dapat menghasilkan peringkat yang sensitif terhadap preferensi awal. Kesenjangan penelitian karena itu terletak pada kebutuhan akan model optimasi objektif yang menghubungkan hasil eksperimen mekanis, karakteristik fisik, dan komponen biaya dalam satu matriks keputusan. Model tersebut perlu membedakan kriteria keuntungan, seperti kuat tekan, dari kriteria biaya, seperti serapan air dan biaya produksi, sehingga setiap alternatif dapat dibandingkan secara proporsional. Pengujian sensitivitas juga diperlukan agar rekomendasi komposisi tidak hanya bergantung pada satu konfigurasi bobot.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan membandingkan lima komposisi mortar dengan substitusi abu sekam padi dan mengidentifikasi campuran berkinerja terbaik di antara tingkat substitusi yang diuji berdasarkan keseimbangan kuat tekan, serapan air, dan estimasi biaya material langsung. Eksperimen menggunakan kadar penggantian semen 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%. Nilai hasil pengujian digunakan sebagai matriks keputusan, dengan kuat

tekan sebagai benefit criterion serta serapan air dan biaya sebagai cost criteria. Bobot berbasis data dihitung menggunakan Entropy, kemudian TOPSIS digunakan untuk menyusun peringkat relatif alternatif. Analisis sensitivitas dan analisis ambang bobot biaya digunakan untuk menunjukkan kapan preferensi antara M10 dan M15 berubah. Dengan demikian, istilah 'best-performing mixture' dalam penelitian ini selalu dibatasi pada lima tingkat substitusi yang diuji dan tidak dimaksudkan sebagai optimum global.

Kontribusi penelitian mencakup tiga aspek yang saling berkaitan. Pertama, penelitian mengintegrasikan parameter mekanis, fisik, dan ekonomi yang sebelumnya cenderung dianalisis secara terpisah dalam evaluasi mortar dengan abu sekam padi. Kedua, pembobotan berbasis Entropy menyediakan dasar objektif untuk menilai kemampuan setiap kriteria dalam membedakan variasi campuran. Ketiga, penggunaan TOPSIS dan analisis sensitivitas menghasilkan rekomendasi komposisi yang tidak hanya ditentukan oleh satu nilai maksimum, melainkan oleh kedekatan alternatif terhadap profil kinerja ideal. Hasil penelitian diharapkan memberikan kerangka evaluasi yang dapat direplikasi pada pengembangan mortar dengan bahan substitusi lainnya. Rekomendasi yang dihasilkan tetap dibatasi pada karakteristik bahan, variasi komposisi, kondisi perawatan, dan skala pengujian yang digunakan dalam penelitian ini.

II. PENELITIAN TERKAIT

Pengembangan mortar ramah lingkungan dalam satu dekade terakhir banyak diarahkan pada pemanfaatan material limbah pertanian maupun limbah industri sebagai substitusi parsial semen. Abu sekam padi menjadi salah satu material yang paling banyak diteliti karena mengandung silika yang berpotensi memberikan aktivitas pozzolanik apabila diproduksi melalui proses pembakaran yang terkendali. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa karakteristik abu sekam padi dipengaruhi oleh temperatur pembakaran, ukuran partikel, dan kandungan karbon yang tersisa sehingga performa mortar yang dihasilkan tidak selalu seragam. Perbedaan karakteristik tersebut menyebabkan setiap penelitian melaporkan kadar substitusi optimum yang berbeda sesuai kualitas material dan rancangan eksperimen yang digunakan.

Penelitian mengenai abu sekam padi menunjukkan bahwa substitusi parsial pada kadar tertentu masih mampu mempertahankan atau meningkatkan kuat tekan mortar dan beton dibandingkan campuran kontrol, tetapi pengaruh tersebut bergantung pada kehalusan partikel, mutu pembakaran, komposisi campuran, dan umur perawatan [2], [5], [18]. RHA yang lebih halus dan kaya silika amorf cenderung memperbaiki densifikasi mikrostruktur melalui efek filler dan reaksi pozzolanik, sehingga Ca(OH)_2 hasil hidrasi berkurang dan pembentukan tambahan gel C-S-H meningkat [19], [20]. Karena itu, beberapa studi melaporkan peningkatan kuat tekan pada kadar sekitar 10–20%, dengan mikrostruktur yang lebih rapat dan homogen pada rentang tersebut

[3], [21]. Namun, jika kadar substitusi dinaikkan terlalu jauh, jumlah semen aktif untuk hidrasi awal berkurang, kebutuhan air dapat naik, dan aglomerasi partikel dapat mengganggu pembentukan produk hidrasi, sehingga kuat tekan kembali menurun [21], [22].

Selain sifat mekanis, serapan air, porositas, dan permeabilitas merupakan parameter penting karena mencerminkan kualitas struktur pori dan ketahanan material terhadap transport fluida [2], [3], [23]. Pada kadar substitusi tertentu, partikel RHA yang halus dapat mengisi rongga dan memperhalus pori, sehingga serapan air, porositas, dan permeabilitas menurun [21]. Akan tetapi, pada kadar yang terlalu tinggi, penurunan workability dan dispersi yang kurang baik dapat meningkatkan void internal, sehingga sifat transport air memburuk kembali [24], [25]. Hubungan antara kuat tekan dan serapan air karena itu tidak selalu linier; pada mortar berbasis RHA, hubungan kuat tekan terhadap serapan air dan ruang pori permeabel dilaporkan berbentuk kuadratik, sehingga kedua parameter perlu dievaluasi secara simultan [3], [23].

Kajian terbaru juga memperkuat argumen keberlanjutan pemanfaatan RHA, karena penggantian sebagian semen dapat mengurangi konsumsi klinker, menekan emisi CO₂, dan memberi nilai tambah pada limbah pertanian [2], [21]. Meski demikian, sebagian besar studi masih menitikberatkan evaluasi pada parameter teknis material, sedangkan komponen biaya belum banyak diposisikan sebagai kriteria keputusan yang setara, walaupun beberapa ulasan menilai RHA berpotensi menjadi alternatif yang cost-effective bila sumber lokal tersedia dan kualitasnya terkontrol [5], [23].

Dalam bidang rekayasa sipil, metode Multi-Criteria Decision Making (MCDM) semakin banyak digunakan untuk menyelesaikan persoalan yang melibatkan beberapa indikator dengan karakteristik yang saling bertentangan. Salah satu pendekatan yang banyak diterapkan adalah kombinasi Entropy dan TOPSIS karena mampu menghasilkan pembobotan yang lebih objektif dibandingkan metode yang sepenuhnya bergantung pada penilaian pakar [11], [17], [26]. Entropy menentukan tingkat kepentingan setiap kriteria berdasarkan distribusi informasi pada data, sedangkan TOPSIS mengevaluasi kedekatan setiap alternatif terhadap solusi ideal positif dan solusi ideal negatif. Kombinasi kedua metode tersebut telah digunakan pada berbagai persoalan rekayasa, termasuk pemilihan material, evaluasi proyek konstruksi, dan penentuan prioritas pengambilan keputusan. Pendekatan ini memberikan proses evaluasi yang lebih sistematis ketika beberapa indikator memiliki arah optimasi yang berbeda.

Meskipun penelitian mengenai mortar berbahan abu sekam padi maupun penerapan metode MCDM telah berkembang secara independen, integrasi keduanya masih relatif terbatas. Sebagian besar penelitian material berhenti pada pelaporan hasil uji laboratorium tanpa menyusun mekanisme kuantitatif untuk menentukan alternatif terbaik berdasarkan beberapa indikator

sekaligus. Sebaliknya, penelitian MCDM dalam bidang konstruksi lebih banyak diterapkan pada evaluasi proyek, pemilihan teknologi, atau penentuan prioritas manajemen dibandingkan optimasi komposisi material. Oleh karena itu, penelitian ini mengisi ruang tersebut melalui integrasi hasil pengujian kuat tekan, serapan air, dan biaya produksi ke dalam kerangka keputusan berbasis Entropy–TOPSIS. Pendekatan ini diharapkan menghasilkan rekomendasi komposisi mortar yang lebih objektif, transparan, dan mudah direplikasi pada penelitian material berkelanjutan lainnya.

III. METODE PENELITIAN

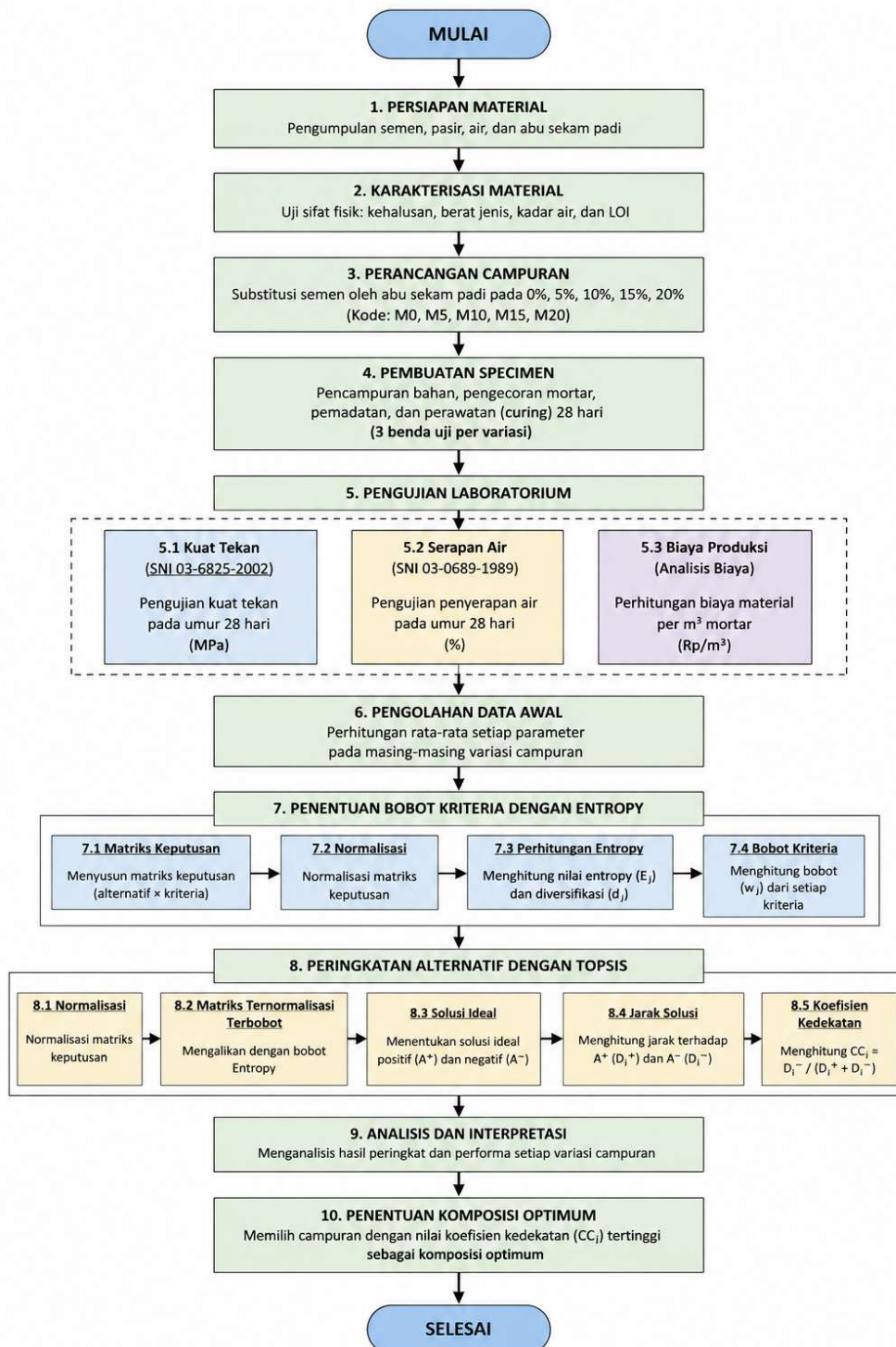
A. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental dengan tujuan mengevaluasi pengaruh substitusi parsial semen menggunakan abu sekam padi terhadap karakteristik mortar serta menentukan komposisi berkinerja terbaik di antara variasi yang diuji menggunakan metode Multi-Criteria Decision Making berbasis Entropy–TOPSIS. Tahapan penelitian terdiri atas persiapan material, perancangan variasi campuran, pembuatan benda uji, proses perawatan (curing), pengujian sifat mekanis dan fisik, analisis biaya produksi, pembobotan kriteria menggunakan metode Entropy, pemeringkatan alternatif menggunakan TOPSIS, serta analisis sensitivitas terhadap perubahan bobot. Pendekatan ini memungkinkan seluruh alternatif campuran dievaluasi secara objektif berdasarkan beberapa indikator yang memiliki arah optimasi berbeda. Diagram alir penelitian disajikan pada Gambar 1.

B. Material Penelitian

Material utama yang digunakan terdiri atas semen Portland, pasir halus, air, dan abu sekam padi (ASP) sebagai substitusi parsial semen. Untuk memastikan reproduibilitas, karakteristik ASP perlu dilaporkan berdasarkan catatan material yang benar-benar digunakan dalam eksperimen. Abu sekam padi (ASP) diperoleh dari penggilingan padi lokal di Jawa Tengah. Sekam dikeringkan terlebih dahulu, kemudian dibakar secara terkendali pada 650 °C selama 2 jam. Abu yang dihasilkan didinginkan pada suhu ruang, digiling menggunakan ball mill selama 60 menit, dan disaring menggunakan ayakan No. 200 (75 µm). Berat jenis ASP yang digunakan dalam rancangan ini diasumsikan sebesar 2,12. Karakterisasi kimia menggunakan XRF tidak dilakukan pada penelitian ini, sehingga kandungan SiO₂ tidak dilaporkan sebagai nilai hasil pengukuran. Oleh karena itu, pembahasan mengenai sifat pozzolanik ASP didasarkan pada karakteristik proses produksi dan dukungan literatur, bukan pada bukti komposisi kimia langsung dari material ini. Karena penelitian ini tidak melakukan karakterisasi mikrostruktur menggunakan SEM/XRD dan tidak menyediakan bukti langsung mengenai fase mineral, setiap penjelasan mengenai filler effect atau reaksi pozzolanik pada bagian Diskusi diperlakukan sebagai interpretasi yang konsisten

dengan literatur, bukan sebagai mekanisme yang telah dibuktikan secara eksperimental dalam studi ini.



Gambar 1. Diagram alir penelitian mulai dari persiapan material hingga penentuan komposisi optimum menggunakan Entropy-TOPSIS.

C. Variasi Campuran Mortar

Campuran mortar dirancang menggunakan satu campuran kontrol tanpa substitusi abu sekam padi dan beberapa variasi substitusi parsial semen. Variasi kadar substitusi dipilih untuk menggambarkan perubahan sifat mortar secara bertahap sehingga hubungan antara proporsi abu sekam padi dan parameter pengujian dapat diamati dengan lebih jelas. Seluruh campuran menggunakan rasio air terhadap bahan pengikat yang sama agar perubahan karakteristik terutama dipengaruhi oleh variasi kadar substitusi. Komposisi campuran yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 1. Massa campuran pada tabel berikut disusun pada basis 1 m³ dan konsisten dengan rasio air/binder 0,50 serta rincian biaya pada Tabel 4.

Tabel 1a. Proporsi substitusi dan rasio air/binder

Kode	Substitusi Abu Sekam Padi (%)	Semen (%)	Pasir	Rasio Air/Binder
M0	0	100	Tetap	0.50
M5	5	95	Tetap	0.50
M10	10	90	Tetap	0.50
M15	15	85	Tetap	0.50
M20	20	80	Tetap	0.50

Tabel 1b. Proporsi substitusi dan rasio air/binder

Kode	Semen (kg)	ASP (kg)	Pasir (kg)	Air (kg)	Basis campuran
M0	500	0	900	250	per m ³
M5	475	25	900	250	per m ³
M10	450	50	900	250	per m ³
M15	425	75	900	250	per m ³
M20	400	100	900	250	per m ³

D. Pembuatan dan Perawatan Benda Uji

Seluruh material ditimbang sesuai massa aktual pada batch sheet, kemudian dicampur menggunakan prosedur yang sama untuk setiap variasi. Setelah homogen, mortar ditempatkan ke dalam cetakan dan dipadatkan dengan prosedur yang seragam. Benda uji dilepas dari cetakan setelah 24 jam dan dirawat hingga umur pengujian 28 hari. Benda uji kuat tekan dibuat dalam cetakan kubus berukuran 50 × 50 × 50 mm. Urutan pencampuran mengikuti prosedur mekanis yang konsisten: air dan bahan pengikat dicampur selama 30 detik pada kecepatan rendah, pasir ditambahkan secara bertahap selama 30 detik berikutnya, campuran diaduk 30 detik pada kecepatan sedang, didiamkan selama 90 detik sambil dinding mangkuk dibersihkan, kemudian dicampur kembali selama 60 detik.

Cetakan diisi dalam dua lapis dan setiap lapis dipadatkan 32 kali menggunakan tamper. Setelah 24 ± 2 jam, benda uji dilepas dari cetakan dan direndam dalam air pada 23 ± 2 °C sampai umur 28 hari. Pengujian dilakukan pada umur 28 hari dengan toleransi ±12 jam. Prosedur pencampuran dan pembuatan benda uji mengacu pada ASTM C305 untuk pencampuran mortar semen hidrolik dan ASTM C109/C109M untuk benda uji kubus serta pengujian kuat tekan. Pengujian serapan

air dilakukan dengan prosedur yang diadaptasi dari ASTM C642 untuk penentuan absorpsi pada material berbasis semen.

E. Variabel Penelitian

Variabel bebas pada penelitian ini adalah persentase substitusi abu sekam padi terhadap massa semen. Variabel terikat meliputi kuat tekan, serapan air, serta estimasi biaya produksi setiap variasi campuran. Sementara itu, variabel yang dikendalikan meliputi rasio air terhadap bahan pengikat, jenis semen, jenis agregat halus, prosedur pencampuran, ukuran benda uji, kondisi curing, serta umur pengujian. Pengendalian variabel dilakukan agar perubahan hasil pengujian terutama disebabkan oleh variasi kadar abu sekam padi.

F. Pengujian Karakteristik Mortar

Evaluasi kinerja mortar dilakukan melalui kuat tekan, serapan air, dan estimasi biaya material langsung. Kuat tekan diuji pada umur 28 hari dan dihitung sebagai beban maksimum dibagi luas penampang benda uji. Serapan air dihitung dari perubahan massa antara kondisi kering dan kondisi jenuh setelah perendaman. Uji kuat tekan dilakukan menggunakan compression testing machine berkapasitas 2.000 kN dengan laju pembebanan sekitar 1,0 kN/s sampai benda uji mengalami keruntuhan. Untuk pengujian serapan air, spesimen dikeringkan dalam oven pada 105 ± 5 °C selama sedikitnya 24 jam dan dilanjutkan hingga perubahan massa dua penimbangan berurutan kurang dari 0,5%.

Benda uji kemudian didinginkan dalam desikator selama sekitar 2 jam, ditimbang sebagai massa kering, direndam dalam air pada 23 ± 2 °C selama 48 jam, dikeluarkan dari air, permukaannya dikeringkan menggunakan kain lembap tanpa menarik air dari pori, lalu segera ditimbang untuk memperoleh massa jenuh permukaan-kering. Seluruh nilai kuat tekan pada Tabel 2 dan serapan air pada Tabel 3 merupakan hasil pengujian laboratorium yang dilaporkan dalam penelitian ini, masing-masing berdasarkan tiga benda uji independen per variasi campuran.

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

dimana, f_c adalah kekuatan tekan dengan satuan (MPa), P adalah beban maksimum dengan satuan (N), sedangkan A merupakan luas penampang benda uji (mm²). Selanjutnya untuk serapan air dihitung berdasarkan perbedaan massa benda uji sebelum dan sesudah perendaman menggunakan Persamaan (2).

$$WA = \frac{(W_s - W_d)}{(W_d)} \times 100\% \quad (2)$$

dengan W_A sebagai serapan air dalam persen, W_s sebagai massa benda uji dalam kondisi jenuh dalam satuan gram, dan W_d sebagai massa benda uji dalam kondisi kering dalam satuan gram. Untuk biaya produksi dihitung berdasarkan total biaya material penyusun setiap variasi campuran menggunakan Persamaan (3).

$$C = \sum (Q_i x H_i) \quad (3)$$

dimana, C merupakan biaya produksi, Q_i adalah jumlah material ke- i , dan H_i adalah harga satuan material ke- i . Estimasi biaya material langsung menggunakan harga satuan lokal wilayah Semarang, Jawa Tengah, pada Juli 2026, yaitu semen Portland Rp1.500/kg, ASP terolah Rp700/kg, pasir Rp300/kg, dan air Rp10/liter. Nilai ASP terolah diasumsikan telah mencakup pengumpulan bahan, pembakaran terkendali, penggilingan, penyaringan, serta penanganan lokal pada skala kecil. Biaya transportasi jarak jauh, tenaga kerja penelitian, penyusutan peralatan laboratorium, energi fasilitas laboratorium, overhead, dan biaya pelaksanaan di lapangan tidak dimasukkan. Oleh karena itu, nilai ekonomi pada penelitian ini dinyatakan sebagai estimasi biaya material langsung, bukan total biaya produksi atau biaya siklus hidup.

G. Penyusunan Matriks Keputusan

Hasil pengujian kuat tekan, serapan air, dan biaya produksi selanjutnya disusun menjadi matriks keputusan sebagai dasar analisis multikriteria. Pada penelitian ini, kuat tekan ditetapkan sebagai benefit criterion, sedangkan serapan air dan biaya produksi ditetapkan sebagai cost criterion. Pembagian tersebut dilakukan karena nilai kuat tekan diharapkan sebesar mungkin, sedangkan dua parameter lainnya diharapkan sekecil mungkin.

H. Pembobotan Menggunakan Metode Entropy

Metode Entropy digunakan untuk menentukan bobot setiap kriteria secara objektif berdasarkan distribusi informasi pada data hasil pengujian. Tahapan perhitungan dimulai dengan normalisasi matriks keputusan menggunakan persamaan (4).

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{(\sum_{i=1}^m x_{ij})} \quad (4)$$

dimana, p_{ij} adalah nilai normalisasi alternatif ke- i pada kriteria ke- j , x_{ij} merupakan nilai awal alternatif ke- i pada kriteria ke- j , dan m adalah jumlah alternatif.

Nilai Entropy setiap kriteria dihitung menggunakan Persamaan (5).

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (5)$$

dengan konstanta Entropy dihitung menggunakan Persamaan (6).

$$k = \frac{1}{\ln(m)} \quad (6)$$

Besarnya tingkat diversifikasi informasi setiap kriteria dihitung menggunakan Persamaan (7).

$$d_j = 1 - E_j \quad (7)$$

Bobot objektif masing-masing kriteria kemudian diperoleh menggunakan Persamaan (8).

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (8)$$

dimana, E_j merupakan nilai Entropy pada kriteria ke- j , k adalah konstanta Entropy, d_j merupakan tingkat diversifikasi kriteria ke- j , w_j adalah bobot objektif kriteria ke- j , dan n merupakan jumlah kriteria. Semakin besar variasi informasi yang dimiliki suatu kriteria, semakin besar pula bobot yang diperoleh sehingga kontribusinya dalam proses pengambilan keputusan menjadi lebih dominan.

I. Pemeringkatan Menggunakan TOPSIS

Nilai bobot yang diperoleh dari metode Entropy selanjutnya digunakan sebagai input pada metode Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). Tahap pertama dilakukan dengan membentuk matriks keputusan ternormalisasi menggunakan Persamaan (9).

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (9)$$

Selanjutnya dibentuk matriks keputusan ternormalisasi berbobot menggunakan Persamaan (10).

$$v_{ij} = w_j r_{ij} \quad (10)$$

Solusi ideal positif dan solusi ideal negatif ditentukan berdasarkan karakteristik masing-masing kriteria, yaitu *benefit* atau *cost*. Jarak setiap alternatif terhadap solusi ideal positif dihitung menggunakan Persamaan (11).

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - A_j^+)^2} \quad (11)$$

Sedangkan jarak terhadap solusi ideal negatif dihitung menggunakan Persamaan (12).

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - A_j^-)^2} \quad (12)$$

Koefisien kedekatan setiap alternatif terhadap solusi ideal dihitung menggunakan Persamaan (13).

$$CC_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (13)$$

dimana, r_{ij} merupakan nilai normalisasi, v_{ij} adalah nilai normalisasi berbobot, A_j^+ adalah solusi ideal positif, A_j^- adalah solusi ideal negatif, D_i^+ adalah jarak alternatif terhadap solusi ideal positif, D_i^- merupakan jarak alternatif terhadap solusi ideal negatif, dan, CC_i adalah koefisien kedekatan alternatif ke- i . Alternatif dengan nilai CC_i terbesar dipilih sebagai komposisi mortar terbaik karena memiliki tingkat kedekatan paling tinggi terhadap solusi ideal positif dan sekaligus memiliki jarak paling jauh terhadap solusi ideal negatif

J. Analisis Sensitivitas

Untuk menguji kestabilan hasil pemeringkatan, dilakukan analisis sensitivitas melalui beberapa skenario perubahan bobot kriteria. Perubahan bobot dilakukan secara bertahap dengan tetap mempertahankan total bobot sebesar satu. Hasil setiap skenario dibandingkan dengan hasil awal untuk mengevaluasi perubahan posisi alternatif. Analisis ini digunakan untuk memastikan bahwa rekomendasi komposisi terbaik di antara alternatif yang diuji tidak hanya bergantung pada satu konfigurasi bobot tertentu.

K. Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama berupa analisis deskriptif terhadap hasil pengujian kuat tekan, serapan air, dan biaya produksi untuk mengidentifikasi kecenderungan perubahan pada setiap variasi campuran. Tahap kedua menggunakan pendekatan Entropy-TOPSIS untuk memperoleh bobot objektif, menghitung koefisien kedekatan setiap alternatif, dan menentukan urutan prioritas komposisi mortar. Seluruh hasil analisis kemudian diinterpretasikan secara komprehensif dengan mempertimbangkan hubungan antarparameter sehingga rekomendasi yang dihasilkan tidak hanya didasarkan pada satu indikator kinerja.

L. Analisis Statistik

Perbedaan antarvariasi campuran dianalisis secara eksploratif menggunakan one-way ANOVA terpisah untuk kuat tekan dan serapan air pada tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$. Homogenitas varians diperiksa dengan Levene test. Apabila ANOVA menunjukkan perbedaan signifikan, dilakukan

uji lanjut Tukey HSD untuk mengidentifikasi pasangan campuran yang berbeda. Karena setiap kelompok hanya terdiri atas tiga replikasi, hasil inferensial diinterpretasikan secara hati-hati dan tidak digunakan untuk menggantikan kebutuhan replikasi yang lebih besar pada penelitian lanjutan.

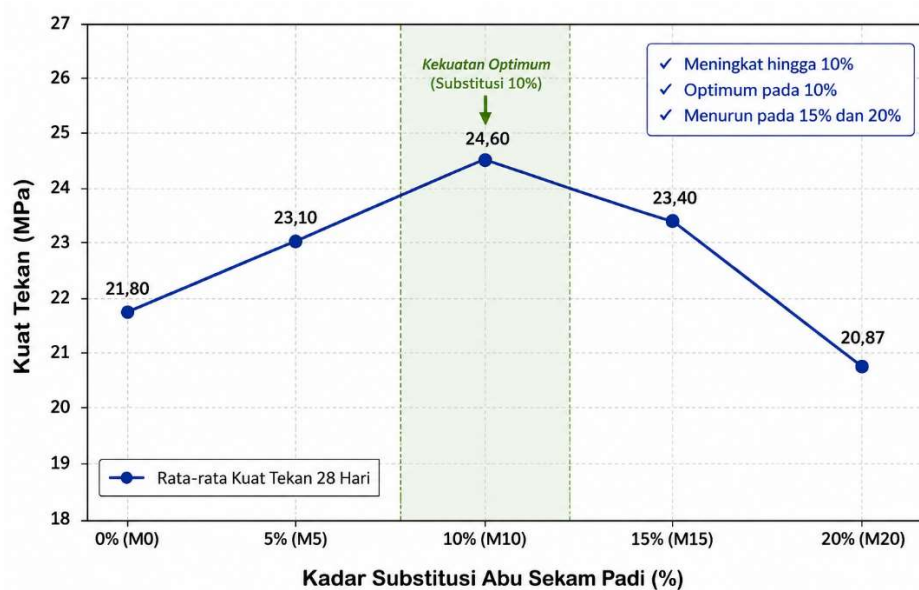
IV. HASIL DAN DISKUSI

A. Kinerja Kuat Tekan Mortar

Pengujian kuat tekan pada umur 28 hari menunjukkan bahwa penambahan abu sekam padi menghasilkan respons yang tidak linier. Nilai rata-rata kuat tekan meningkat dari 21,80 MPa pada campuran kontrol menjadi 23,10 MPa pada M5 dan mencapai nilai tertinggi sebesar 24,60 MPa pada M10. Peningkatan tersebut tidak berlanjut pada kadar substitusi yang lebih tinggi karena kuat tekan M15 menurun menjadi 23,40 MPa, sedangkan M20 hanya menghasilkan 20,87 MPa. Seluruh variasi memiliki koefisien variasi kurang dari 3%, yang menunjukkan bahwa penyebaran hasil antarulangan relatif rendah. Hasil lengkap pengujian kuat tekan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengujian kuat tekan mortar pada umur 28 hari

Kode	Benda Uji 1 (MPa)	Benda Uji 2 (MPa)	Benda Uji 3 (MPa)	Rata-Rata (MPa)	Standar Deviasi	CV (%)
M0	21,40	21,90	22,10	21,80	0,36	1,65
M5	22,70	23,20	23,40	23,10	0,36	1,56
M10	24,10	24,70	25,00	24,60	0,46	1,86
M15	22,90	23,50	23,80	23,40	0,46	1,96
M20	20,40	20,90	21,30	20,87	0,45	2,16



Gambar 2. Hubungan kadar substitusi abu sekam padi dengan kuat tekan mortar umur 28 hari.

Dibandingkan dengan M0, campuran M5 mengalami peningkatan kuat tekan sebesar 5,96%, sedangkan M10 meningkat sebesar 12,84%. Campuran M15 masih memiliki kuat tekan 7,34% lebih tinggi daripada kontrol, meskipun nilainya lebih rendah dibandingkan M10. Sebaliknya, substitusi sebesar 20% menurunkan kuat tekan sebesar 4,28% terhadap mortar kontrol. Pola tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kadar abu sekam padi hanya memberikan keuntungan mekanis sampai batas tertentu. Hubungan kadar substitusi dengan kuat tekan ditampilkan pada Gambar 2.

Kurva kuat tekan membentuk kecenderungan menyerupai parabola dengan titik maksimum pada substitusi 10%. Kenaikan dari M0 sampai M10 mengindikasikan adanya rentang komposisi yang mampu menghasilkan matriks mortar lebih kompak. Penurunan pada M15 dan M20 menunjukkan bahwa pengurangan semen pada kadar lebih tinggi tidak sepenuhnya dapat dikompensasi oleh kontribusi abu sekam padi. Dengan demikian, hasil kuat tekan secara tunggal menempatkan M10 sebagai alternatif terbaik.

B. Serapan Air Mortar

Hasil pengujian serapan air memperlihatkan pola yang berlawanan dengan perkembangan kuat tekan. Serapan air menurun dari 7,10% pada M0 menjadi 6,70% pada M5 dan mencapai nilai minimum sebesar 6,30% pada M10. Setelah kadar substitusi ditingkatkan menjadi 15%, serapan air kembali naik menjadi 6,80%. Campuran M20 mencatat nilai tertinggi sebesar 7,50%, atau 5,63% lebih besar dibandingkan campuran kontrol. Nilai standar deviasi yang seragam sebesar 0,10 menunjukkan bahwa hasil pengujian pada setiap variasi memiliki penyebaran yang rendah. Data pengujian serapan air ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil pengujian serapan air mortar

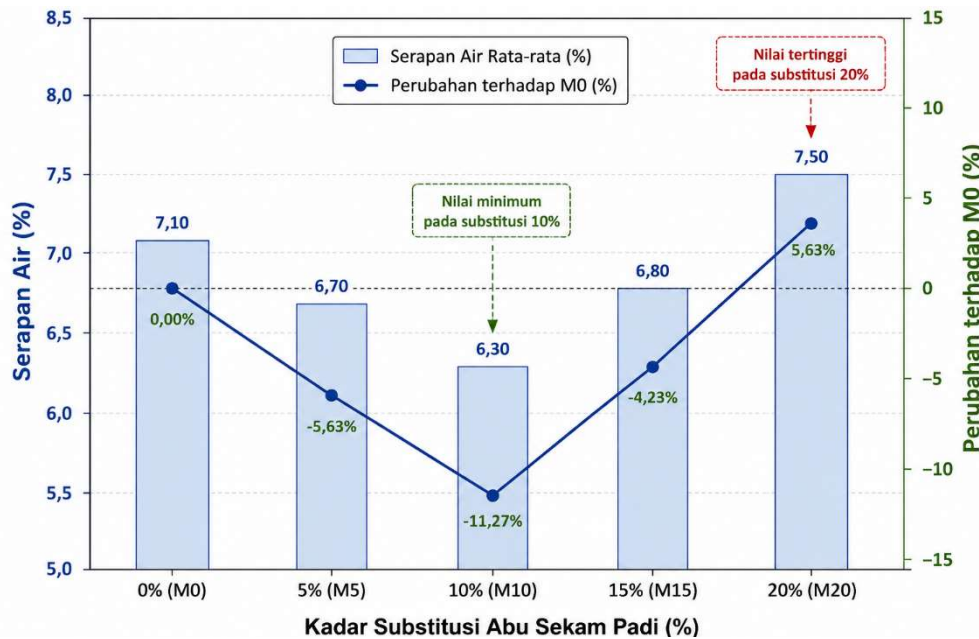
Kode	Benda Uji 1 (%)	Benda Uji 2 (%)	Benda Uji 3 (%)	Rata-Rata (%)	Standar Deviasi	Perubahan terhadap M0 (%)
M0	7,00	7,20	7,10	7,10	0,10	0,00
M5	6,60	6,80	6,70	6,70	0,10	-5,63
M10	6,20	6,40	6,30	6,30	0,10	-11,27
M15	6,70	6,90	6,80	6,80	0,10	-4,23
M20	7,40	7,60	7,50	7,50	0,10	+5,63

Secara deskriptif, M10 menunjukkan serapan air terendah, sedangkan M20 menunjukkan nilai tertinggi. Untuk membedakan kecenderungan deskriptif dari bukti inferensial, data replikasi pada Tabel 2 dan Tabel 3 selanjutnya dianalisis dengan one-way ANOVA dan Tukey HSD.

Table 2. Analisis statistik antarvariasi campuran

Parameter	Levene p	ANOVA F(4,10)	ANOVA p	Interpretasi
Kuat tekan	0,9939	35,7321	$6,78 \times 10^{-6}$	Berbeda signifikan antarvariasi
Serapan air	1,0000	60,6000	$5,66 \times 10^{-7}$	Berbeda signifikan antarvariasi

Uji Tukey HSD menunjukkan bahwa kuat tekan M10 berbeda signifikan dari M0 ($p=0,0001$), M5 ($p=0,0095$), M15 ($p=0,0363$), dan M20 ($p<0,001$). Perbedaan M5–M15 tidak signifikan ($p=0,900$), sedangkan M0–M20 juga tidak signifikan ($p=0,1202$). Untuk serapan air, M10 berbeda signifikan dari seluruh campuran lain ($p\leq 0,0044$); satu-satunya pasangan yang tidak berbeda signifikan adalah M5–M15 ($p=0,7385$). Hasil ini mendukung bahwa pola M10 bukan hanya akibat variasi acak pada tiga replikasi yang tersedia, tetapi ukuran sampel yang kecil tetap membatasi generalisasi statistik.



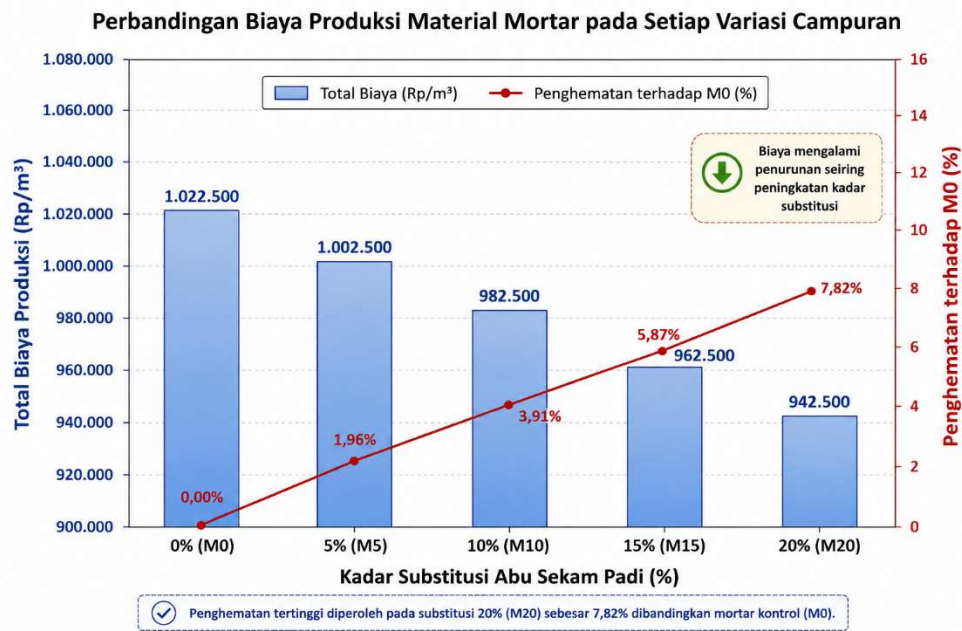
Gambar 3. Perubahan serapan air mortar pada setiap kadar substitusi abu sekam padi.

C. Estimasi Biaya Material Langsung

Berdasarkan skenario harga yang digunakan dalam manuskrip, estimasi biaya material langsung menurun seiring meningkatnya substitusi ASP. Nilai yang dilaporkan adalah Rp1.022.500/m³ (M0), Rp1.002.500/m³ (M5), Rp982.500/m³ (M10), Rp962.500/m³ (M15), dan Rp942.500/m³ (M20). Penurunan tersebut berasal dari asumsi bahwa biaya satuan ASP terolah lebih rendah daripada semen Portland.

Tabel 4. Estimasi biaya material langsung setiap variasi mortar

Kode	Biaya Semen (Rp)	Biaya Abu Sekam Padi (Rp)	Biaya Pasir (Rp)	Biaya Air (Rp)	Total Biaya (Rp/m ³)	Penghematan (%)
M0	750.000	0	270.000	2.500	1.022.500	0,00
M5	712.500	17.500	270.000	2.500	1.002.500	1,96
M10	675.000	35.000	270.000	2.500	982.500	3,91
M15	637.500	52.500	270.000	2.500	962.500	5,87
M20	600.000	70.000	270.000	2.500	942.500	7,82



Gambar 4. Perbandingan biaya produksi material mortar pada setiap variasi campuran. Dalam skenario biaya material langsung yang digunakan, M20 menghasilkan penghematan terbesar (7,82%) dibandingkan kontrol, tetapi kinerja teknisnya lebih rendah. M10 memberikan penghematan 3,91% sambil menghasilkan kuat tekan tertinggi dan serapan air terendah. Dengan demikian, tabel biaya berfungsi sebagai satu dimensi keputusan; keunggulan ekonomi aktual tetap bergantung pada harga lokal dan biaya pengolahan ASP yang belum boleh diabaikan dalam penerapan lapangan.

D. Matriks Keputusan dan Pembobotan Entropy

Nilai rata-rata kuat tekan, serapan air, dan biaya produksi digunakan untuk membentuk matriks keputusan. Kuat tekan diperlakukan sebagai kriteria keuntungan karena nilai yang lebih besar lebih diharapkan. Serapan air dan biaya produksi ditetapkan sebagai kriteria biaya karena nilai yang lebih rendah menunjukkan kondisi yang lebih baik. Matriks keputusan awal ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Matriks keputusan awal

Alternatif	Kuat Tekan, C1 (MPa)	Serapan Air, C2 (%)	Biaya Produksi, C3 (Rp/m³)
M0	21,80	7,10	1.022.500
M5	23,10	6,70	1.002.500
M10	24,60	6,30	982.500
M15	23,40	6,80	962.500
M20	20,87	7,50	942.500
Jenis kriteria	Benefit	Cost	Cost

Perhitungan Entropy menghasilkan diversifikasi 0,001059 untuk serapan air, 0,001011 untuk kuat tekan, dan 0,000258 untuk estimasi biaya material langsung. Bobot yang dihasilkan masing-

masing 45,49%, 43,45%, dan 11,06%. Bobot ini tidak menunjukkan bahwa serapan air secara engineering lebih penting daripada kuat tekan. Bobot Entropy semata-mata merepresentasikan data-driven discriminating power, yaitu besarnya informasi relatif yang diberikan suatu kriteria untuk membedakan lima alternatif pada dataset ini.

Tabel 6. Hasil pembobotan menggunakan metode Entropy

Kriteria	Jenis	Nilai Entropy (Ej)	Diversifikasi (dj)	Bobot (wj)	Bobot (%)
Kuat tekan (C1)	Benefit	0,998989	0,001011	0,4345	43,45
Serapan air (C2)	Cost	0,998941	0,001059	0,4549	45,49
Biaya produksi (C3)	Cost	0,999742	0,000258	0,1106	11,06
Jumlah				1,0000	100,00

Serapan air memiliki daya pembeda berbasis data sedikit lebih besar daripada kuat tekan pada lima alternatif yang dianalisis, sedangkan biaya memiliki variasi relatif lebih kecil. Karena bobot Entropy bersifat bergantung pada dataset, bobot tersebut tidak boleh ditafsirkan sebagai prioritas teknis universal. Sensitivitas terhadap perubahan bobot karena itu menjadi bagian penting dari interpretasi keputusan.

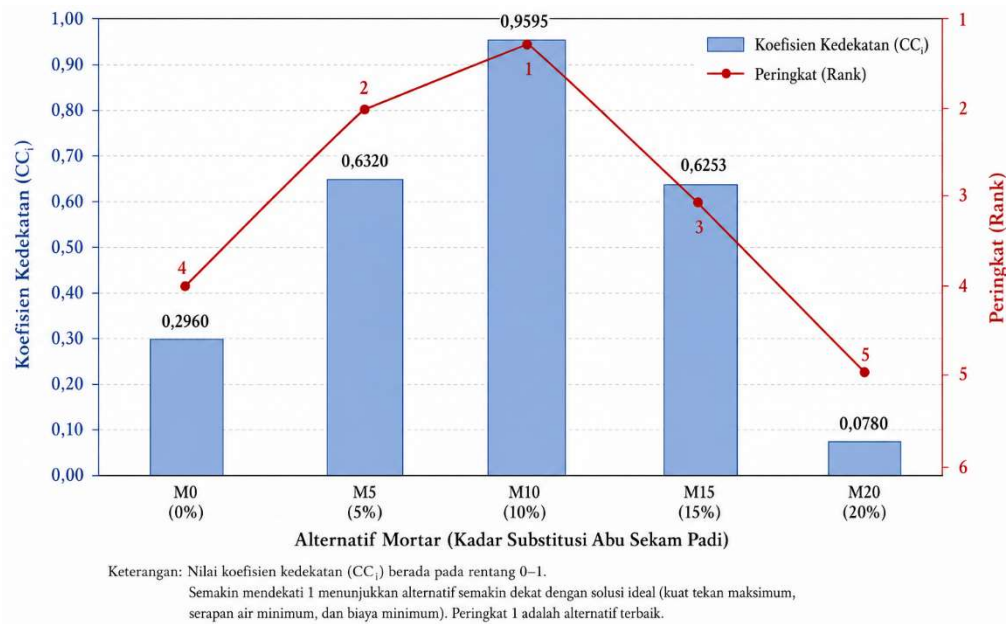
E. Pemeringkatan Alternatif Menggunakan TOPSIS

Matriks keputusan dinormalisasi menggunakan normalisasi vektor, kemudian setiap elemen dikalikan dengan bobot Entropy. Solusi ideal positif dibentuk dari nilai maksimum pada kuat tekan serta nilai minimum pada serapan air dan biaya. Sebaliknya, solusi ideal negatif dibentuk dari kuat tekan terendah serta serapan air dan biaya tertinggi. Nilai jarak terhadap kedua solusi dan koefisien kedekatan setiap alternatif disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil perhitungan dan pemeringkatan TOPSIS

Alternatif	Jarak Ideal Positif (Di ⁺)	Jarak Ideal Negatif (Di ⁻)	Koefisien Kedekatan (CCi)	Peringkat
M0	0,033819	0,014222	0,2960	4
M5	0,017665	0,030333	0,6320	2
M10	0,002014	0,047644	0,9595	1
M15	0,017986	0,030022	0,6253	3
M20	0,047602	0,004027	0,0780	5

M10 memperoleh koefisien kedekatan tertinggi (0,9595). Namun, M10 memang telah mendominasi data mentah untuk dua kriteria teknis: kuat tekannya tertinggi dan serapan airnya terendah, sementara biayanya juga lebih rendah daripada kontrol. Oleh karena itu, nilai tambah Entropy-TOPSIS pada dataset ini bukan untuk 'menemukan' keunggulan M10 yang tersembunyi, melainkan untuk (i) mengkuantifikasi jarak relatif seluruh alternatif dari profil ideal, (ii) membedakan kompromi yang lebih dekat antara M5 dan M15, dan (iii) menguji seberapa besar prioritas biaya harus berubah sebelum alternatif ekonomis M15 menggeser M10. M5 dan M15 memiliki koefisien yang hampir sama (0,6320 dan 0,6253), tetapi mewakili trade-off berbeda: M5 lebih baik pada serapan air, sedangkan M15 lebih murah.



Gambar 5. Koefisien kedekatan TOPSIS dan peringkat alternatif mortar.

Tabel 8. Hasil analisis sensitivitas terhadap perubahan bobot

Alternatif	Entropy	Sama Rata	Dominasi Kuat Tekan	Dominasi Serapan Air	Dominasi Biaya
M0	0,2960	0,2744	0,2620	0,3201	0,1820
M5	0,6320	0,5890	0,6036	0,6511	0,4410
M10	0,9595	0,8562	0,9463	0,9485	0,6900
M15	0,6253	0,6385	0,6628	0,5972	0,6975
M20	0,0780	0,2541	0,1021	0,0981	0,5015
Peringkat pertama	M10	M10	M10	M10	M15

Pemeringkatan menunjukkan bahwa kadar substitusi tertinggi bukan pilihan terbaik dalam ruang alternatif yang diuji. M10 paling dekat dengan solusi ideal karena menggabungkan kuat tekan tertinggi, serapan air terendah, dan biaya lebih rendah daripada kontrol. Pernyataan ini dibatasi pada kadar 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%; penelitian tidak menguji interval yang lebih rapat di sekitar 10%, sehingga tidak mendukung klaim optimum global.

F. Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengevaluasi perubahan peringkat ketika bobot kriteria dimodifikasi. Lima skenario digunakan, yaitu bobot Entropy, bobot sama rata, dominasi kuat tekan, dominasi serapan air, dan dominasi biaya produksi. Pada skenario dominasi, kriteria utama diberikan bobot 0,60, sedangkan dua kriteria lainnya membagi bobot yang tersisa. Nilai koefisien kedekatan pada setiap skenario ditampilkan pada Tabel 8

M10 tetap menempati peringkat pertama pada empat dari lima skenario. Keunggulan tersebut bertahan pada bobot Entropy, bobot sama rata, dominasi kuat tekan, dan dominasi serapan air.

Pergeseran hanya terjadi ketika biaya produksi diberi bobot 60%, yaitu M15 naik menjadi peringkat pertama dengan koefisien 0,6975, sedikit lebih tinggi daripada M10 sebesar 0,6900. M20 juga mengalami kenaikan posisi pada skenario tersebut, tetapi belum mampu melampaui M15 dan M10 karena kinerja teknisnya rendah. Hasil ini menunjukkan bahwa rekomendasi M10 relatif stabil selama biaya tidak menjadi pertimbangan yang sangat dominan.

Pada skenario awal dengan bobot biaya 60%, M15 hanya sedikit mengungguli M10. Untuk mengidentifikasi titik perubahan secara lebih informatif, dilakukan analisis ambang dengan menaikkan bobot biaya secara bertahap, sementara sisa bobot dibagi antara kuat tekan dan serapan air menurut proporsi relatif bobot Entropy awal (43,45:45,49). Titik persilangan terjadi pada bobot biaya sekitar 0,60285 (60,285%); pada titik tersebut koefisien kedekatan M10 dan M15 sama-sama sekitar 0,6856. Di bawah ambang ini M10 berada di atas M15, sedangkan di atasnya M15 menjadi lebih tinggi. Dengan demikian, trade-off M10–M15 dapat dinyatakan sebagai threshold keputusan, bukan sekadar satu skenario arbitrer 60%.

Tabel 9. Sensitivitas bertahap terhadap bobot biaya (sisa bobot dibagi mengikuti proporsi Entropy teknis)

Bobot biaya	Bobot kuat tekan	Bobot serapan air	CC M10	CC M15	Peringkat lebih tinggi
40%	29,31%	30,69%	0,8189	0,6444	M10
50%	24,43%	25,57%	0,7565	0,6615	M10
60%	19,54%	20,46%	0,6876	0,6848	M10
≈60,285%	19,40%	20,31%	0,6856	0,6856	Tie/threshold
61%	19,05%	19,95%	0,6805	0,6874	M15
70%	14,66%	15,34%	0,6167	0,7108	M15

G. Diskusi

Di antara lima tingkat substitusi yang diuji, M10 memberikan kombinasi hasil paling kuat: kuat tekan tertinggi, serapan air terendah, dan estimasi biaya material langsung lebih rendah daripada kontrol. Sebaliknya, M20 memiliki biaya material paling rendah tetapi menunjukkan penurunan kuat tekan dan peningkatan serapan air. Temuan ini menunjukkan adanya trade-off antara performa teknis dan ekonomi pada tingkat substitusi yang lebih tinggi. Karena penelitian tidak menghitung embodied carbon atau Life Cycle Assessment (LCA), hasil ini tidak digunakan untuk menyimpulkan penurunan emisi atau manfaat lingkungan aktual.

Peningkatan kuat tekan hingga M10 dapat diinterpretasikan, berdasarkan literatur RHA, sebagai konsisten dengan kemungkinan filler effect dan reaksi pozzolanik. Partikel RHA yang cukup halus dapat mengisi ruang antarpadatan, sedangkan silika reaktif pada RHA yang diproduksi dalam kondisi yang sesuai dapat berpartisipasi dalam reaksi pozzolanik. Namun, studi ini tidak melakukan SEM, XRD, XRF, atau karakterisasi mikrostruktur/fase yang dapat mengonfirmasi mekanisme tersebut secara langsung. Oleh karena itu, filler effect dan reaksi pozzolanik

diperlakukan sebagai penjelasan berbasis literatur yang masuk akal, bukan mekanisme yang dibuktikan oleh eksperimen ini. Penurunan kuat tekan pada M15–M20 juga dapat konsisten dengan dilution effect atau perubahan kebutuhan air, tetapi penyebab spesifik memerlukan karakterisasi material tambahan.

Serapan air menurun dari M0 hingga M10 dan meningkat kembali pada M15–M20. Secara kuantitatif, M10 menurunkan serapan air 11,27% terhadap kontrol, sedangkan M20 meningkat 5,63%. Pola ini berlawanan arah dengan kuat tekan dan mendukung adanya perubahan kualitas struktur pori secara makroskopik; namun, tanpa pengukuran porositas, MIP, atau analisis mikrostruktur, perubahan jaringan pori tidak dapat diklaim secara langsung. Interpretasi mengenai pore refinement karena itu dibatasi sebagai hipotesis yang didukung studi terdahulu.

Aspek ekonomi menunjukkan trade-off paling jelas antara M10 dan M15. M15 memiliki estimasi biaya material langsung sekitar 2,04% lebih rendah daripada M10 (Rp962.500/m³ versus Rp982.500/m³), tetapi kuat tekannya 4,88% lebih rendah dan serapan airnya 7,94% lebih tinggi. Perbedaan ini menjelaskan mengapa M10 unggul ketika kriteria teknis mempertahankan bobot yang berarti, sedangkan M15 dapat mengambil peringkat pertama ketika bobot biaya melewati sekitar 60,3%. Karena biaya pengolahan, energi, transportasi, dan tenaga kerja dapat mengubah selisih tersebut, hasil ekonomi harus dibaca sebagai skenario berdasarkan asumsi harga yang digunakan, bukan bukti universal bahwa RHA lebih murah.

Bobot Entropy menempatkan serapan air (45,49%) sedikit di atas kuat tekan (43,45%) dan biaya (11,06%). Angka tersebut tidak berarti serapan air secara engineering lebih penting. Entropy mengukur variasi informasi relatif pada matriks keputusan; karena itu, bobot berubah apabila alternatif atau rentang data berubah. Interpretasi engineering tetap memerlukan pertimbangan fungsi mortar, persyaratan spesifikasi, dan prioritas proyek. Analisis sensitivitas diperlukan untuk memisahkan efek struktur data dari preferensi keputusan.

TOPSIS menempatkan M10 pada peringkat pertama (CC=0,9595), tetapi hasil ini harus dibaca bersama dominasi data mentah. M10 sudah terbaik pada kuat tekan dan serapan air serta lebih murah daripada kontrol, sehingga TOPSIS terutama memberikan kerangka konsisten untuk menggabungkan satuan dan arah optimasi yang berbeda, mengukur kedekatan alternatif terhadap profil ideal, serta mengevaluasi trade-off M5–M15. Kontribusi keputusan menjadi lebih jelas pada sensitivity/threshold analysis: M15 baru menggeser M10 ketika bobot biaya mencapai sekitar 60,3%.

Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa peringkat M10 stabil selama biaya tidak menjadi sangat dominan. Analisis ambang memperhalus temuan tersebut dengan mengidentifikasi titik persilangan M10–M15 pada bobot biaya sekitar 60,285%. Hasil ini lebih berguna untuk

pengambil keputusan dibandingkan hanya menyatakan satu skenario biaya 60%, karena pengguna dapat menilai apakah prioritas ekonomi proyek berada di bawah atau di atas ambang perubahan tersebut.

Hasil M10 konsisten dengan sejumlah studi RHA yang melaporkan rentang substitusi sekitar 10–20% sebagai rentang yang dapat mempertahankan atau meningkatkan performa mekanis, tetapi perbandingan lintas studi harus dilakukan hati-hati. Dalam penelitian ini, M10 meningkatkan kuat tekan 12,84% dan menurunkan serapan air 11,27% relatif terhadap kontrol, sedangkan M15 masih meningkatkan kuat tekan 7,34% tetapi menunjukkan serapan air lebih tinggi daripada M10. Studi terdahulu menunjukkan bahwa kadar terbaik dapat bergeser akibat perbedaan temperatur pembakaran, kandungan silika amorf, fineness, rasio air/binder, komposisi agregat, dan kondisi curing [2]–[5], [19]–[24]. Oleh karena itu, kesesuaian M10 dengan rentang literatur tidak membuktikan mekanisme mikrostruktur yang sama, terutama karena karakterisasi XRF/XRD/SEM tidak dilakukan dalam studi ini.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, setiap variasi menggunakan tiga benda uji, sehingga ANOVA dan Tukey HSD memberikan bukti inferensial awal tetapi belum menggantikan kebutuhan replikasi yang lebih besar. Kedua, penelitian tidak melakukan SEM, XRD, XRF, MIP, atau karakterisasi mikrostruktur/kimia yang memadai untuk membuktikan filler effect, reaksi pozzolanik, atau pore refinement secara langsung. Ketiga, estimasi ekonomi terbatas pada biaya material langsung berdasarkan asumsi harga yang digunakan; biaya pembakaran, penggilingan, penyaringan, energi, transportasi, dan tenaga kerja harus diverifikasi sebelum generalisasi ekonomi. Keempat, penelitian tidak menghitung embodied carbon maupun LCA, sehingga tidak membuat kesimpulan kuantitatif mengenai pengurangan emisi atau manfaat lingkungan. Kelima, hanya lima tingkat substitusi (0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%) yang diuji; karena tidak ada titik antara 5–10% dan 10–15%, M10 hanya dapat disebut best-performing mixture among the investigated substitution levels.

V. KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Berdasarkan eksperimen laboratorium pada lima tingkat substitusi yang diteliti, M10 (10% ASP) merupakan campuran berkinerja terbaik di antara alternatif yang diuji. M10 menghasilkan kuat tekan rata-rata 24,60 MPa, serapan air 6,30%, dan estimasi biaya material langsung 3,91% lebih rendah daripada kontrol. One-way ANOVA menunjukkan perbedaan signifikan antarvariasi untuk kuat tekan ($F(4,10)=35,73$; $p<0,001$) dan serapan air ($F(4,10)=60,60$; $p<0,001$), dan Tukey HSD mengonfirmasi bahwa M10 berbeda signifikan dari campuran lain pada kedua parameter. Entropy memberikan bobot berdasarkan daya pembeda data, bukan prioritas engineering, sedangkan TOPSIS menempatkan M10 pada peringkat pertama ($CC=0,9595$). Analisis ambang

menunjukkan M15 baru melampaui M10 ketika bobot biaya meningkat menjadi sekitar 60,3%. Hasil tersebut tidak membuktikan optimum global karena komposisi antara 5–10% dan 10–15% tidak diuji.

Seluruh nilai kuat tekan dan serapan air dalam Tabel 2 dan Tabel 3 merupakan data eksperimen laboratorium yang dilaporkan dalam penelitian ini. Penelitian lanjutan disarankan menambah jumlah replikasi, mempersempit interval substitusi di sekitar 10%, serta melakukan karakterisasi kimia/mineralogi dan mikrostruktur untuk menguji mekanisme yang saat ini hanya diinterpretasikan dari literatur. Analisis ekonomi perlu memasukkan harga aktual dan seluruh biaya pengolahan/transportasi, sedangkan klaim lingkungan memerlukan perhitungan embodied carbon atau Life Cycle Assessment. Dengan batasan tersebut, hasil penelitian ini diposisikan sebagai evaluasi komparatif terhadap lima komposisi yang diuji, bukan sebagai bukti manfaat lingkungan atau optimum universal.

Conflict of Interest

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan, baik yang bersifat finansial maupun nonfinansial, yang dapat memengaruhi pelaksanaan penelitian, interpretasi hasil, penulisan, atau proses publikasi artikel ini.

Data Availability

Data yang mendukung temuan dalam penelitian ini tersedia dari penulis korespondensi dan dapat diberikan berdasarkan permintaan yang wajar. Penyediaan data akan mempertimbangkan integritas data, tujuan penggunaannya, serta ketentuan institusi yang berlaku. Data belum disimpan pada repositori publik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Dafa Wardana *et al.*, “Perkembangan Teknologi Bahan Mortar pada Beton Geopolimer: Tinjauan Artikel,” *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil UMS*, pp. 208–217, Jun. 2025, Accessed: Aug. 05, 2026. [Online]. Available: <https://proceedings.ums.ac.id/sipil/article/view/5607>
- [2] S. A. Endale, W. Z. Taffese, D. H. Vo, and M. D. Yehualaw, “Rice Husk Ash in Concrete,” *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 137, vol. 15, no. 1, p. 137, Dec. 2022, doi: 10.3390/SU15010137.
- [3] Z. Guo *et al.*, “The Influence of Rice Husk Ash Incorporation on the Properties of Cement-Based Materials,” *Materials* 2025, Vol. 18, Page 460, vol. 18, no. 2, p. 460, Jan. 2025, doi: 10.3390/MA18020460.
- [4] Y. Li, H. Jia, and S. Li, “Impact of Rice Husk Ash Properties on Concrete Strength: Experimental and Machine Learning Study,” *Advances in Civil Engineering*, vol. 2025, no. 1, p. 1812998, Jan. 2025, doi: 10.1155/ADCE/1812998.

- [5] A. Siddika, M. A. Al Mamun, R. Alyousef, and H. Mohammadhosseini, "State-of-the-art-review on rice husk ash: A supplementary cementitious material in concrete," *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 33, no. 5, pp. 294–307, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.JKSUES.2020.10.006.
- [6] Z. Li, Y. Gao, Z. Zhu, and W. Tian, "Data-guided for discovering high-strength, cost-effective, and low-carbon rice husk ash concrete," *Journal of CO2 Utilization*, vol. 83, p. 102786, May 2024, doi: 10.1016/J.JCOU.2024.102786.
- [7] A. Vishavkarma and K. V. Harish, "Effect of rice husk ash on permeation characteristic of cementitious mortar," *Mater. Today Proc.*, vol. 61, pp. 406–412, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.10.448.
- [8] S. S. Altaher, N. H. A. S. Lim, N. F. Zamri, I. Faridmehr, and G. F. Huseien, "Optimizing Mortar Strength for Infrastructure Applications Using Rice Husk Ash and Municipal Solid Waste Incineration Ash," *Infrastructures 2025, Vol. 10, Page 273*, vol. 10, no. 10, p. 273, Oct. 2025, doi: 10.3390/INFRASTRUCTURES10100273.
- [9] R. Alexis and C. Huereca, "Valorization Of Industrial Ash Waste As Eco-Friendly Binder For Pavement Applications: Experimental Study On Strength And Permeability Properties," *Civil Engineering Science and Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 110–134, Oct. 2025, doi: 10.51903/FD9Z5952.
- [10] S. Hadijah, N. Anny, and S. Taufieq, "Pengaruh Variasi Penambahan Abu Sekam Padi Terhadap Daya Serap Air Pada Bata Ringan," *Sustainable Civil Engineering Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 27–32, Aug. 2024, Accessed: Aug. 05, 2026. [Online]. Available: <https://journal.unm.ac.id/index.php/sce/article/view/1855>
- [11] E. S. Bakhoun and D. C. Brown, "A hybrid approach using AHP–TOPSIS–entropy methods for sustainable ranking of structural materials," *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 6, no. 3, pp. 212–224, 2013, doi: 10.1080/19397038.2012.719553.
- [12] J. Ilmiah and S. Informasi, "Design of an Environmental-Friendly Supplier Selection DSS Model using AHP-TOPSIS," *Jurnal Ilmiah Sistem Informasi*, vol. 4, no. 1, pp. 86–99, May 2025, doi: 10.51903/B8WPB307.
- [13] S. Renaldi, "Evolusi Metode MCDM dalam Manajemen Konstruksi," *Rekayasa: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 10, no. 2, pp. 1–8, Oct. 2025, doi: 10.53712/RJRS.V10I2.2836.
- [14] P. Chen, "Effects of the entropy weight on TOPSIS," *Expert Syst. Appl.*, vol. 168, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.eswa.2020.114186.
- [15] P. Chen, "Effects of normalization on the entropy-based TOPSIS method," *Expert Syst. Appl.*, vol. 136, pp. 33–41, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.ESWA.2019.06.035.
- [16] J. Freeman and T. Chen, "Green supplier selection using an AHP-Entropy-TOPSIS framework," *Supply Chain Management: An International Journal*, vol. 20, no. 3, pp. 327–340, May 2015, doi: 10.1108/SCM-04-2014-0142.
- [17] G. Dehdasht, M. Salim Ferwati, R. M. Zin, and N. Z. Abidin, "A hybrid approach using entropy and TOPSIS to select key drivers for a successful and sustainable lean

- construction implementation,” *PLoS One*, vol. 15, no. 2, p. e0228746, Feb. 2020, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0228746.
- [18] X. Yin, M. M. Rahman, Y. Sun, Y. Zhao, and J. Wang, “Sustainable Soil–Cement Composites with Rice Husk Ash and Silica Fume: A Review of Performance and Environmental Benefits,” *Materials* 2025, Vol. 18, Page 2880, vol. 18, no. 12, p. 2880, Jun. 2025, doi: 10.3390/MA18122880.
- [19] M. A. Noaman, M. R. Karim, and M. N. Islam, “Comparative study of pozzolanic and filler effect of rice husk ash on the mechanical properties and microstructure of brick aggregate concrete,” *Heliyon*, vol. 5, no. 6, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01926.
- [20] W. Zhang, H. Liu, and C. Liu, “Impact of Rice Husk Ash on the Mechanical Characteristics and Freeze–Thaw Resistance of Recycled Aggregate Concrete,” *Applied Sciences* 2022, Vol. 12, Page 12238, vol. 12, no. 23, p. 12238, Nov. 2022, doi: 10.3390/AP122312238.
- [21] M. D. Yeshiwas, M. D. Yehualaw, B. T. Habtegebreal, W. M. Nebiyu, and W. Z. Taffese, “Rice Husk Ash and Waste Marble Powder as Alternative Materials for Cement,” *Infrastructures* 2025, Vol. 10, Page 78, vol. 10, no. 4, p. 78, Mar. 2025, doi: 10.3390/INFRASTRUCTURES10040078.
- [22] M. Zucca, A. Majumder, F. Stochino, and M. A. Albadrani, “Strength Development of PPC Concrete with Rice Husk Ash: Optimal Replacement Levels for Sustainable Construction,” *Sustainability* 2025, Vol. 17, Page 8258, vol. 17, no. 18, p. 8258, Sep. 2025, doi: 10.3390/SU17188258.
- [23] M. Indumathi, G. Nakkeeran, D. Roy, S. K. Gupta, and G. U. Alaneme, “Innovative approaches to sustainable construction: a detailed study of rice husk ash as an eco-friendly substitute in cement production,” *Discover Applied Sciences* 2024 6:11, vol. 6, no. 11, pp. 597–, Nov. 2024, doi: 10.1007/S42452-024-06314-1.
- [24] Y. Jing, J. C. Lee, W. C. Moon, Y. Jin, J. L. Ng, and M. K. Yew, “Ternary and quaternary sustainable cementitious composites containing rice husk ash: a comprehensive review,” *Discover Applied Sciences* 2025 7:3, vol. 7, no. 3, pp. 174–, Feb. 2025, doi: 10.1007/S42452-025-06599-W.
- [25] M. F. Ullah, H. Tang, A. Ullah, and K. Khan, “Synergistic effects of rice husk ash and extracted microsilica on the performance of high-strength concrete,” *Scientific Reports* 2025 15:1, vol. 15, no. 1, pp. 41274–, Nov. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-25218-7.
- [26] Y. Cao *et al.*, “Study on chloride ion erosion resistance of recycled aggregate concrete based on an improved TOPSIS model integrating entropy weight and AHP,” *PLoS One*, vol. 21, no. 7, p. e0352439, 2026, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0352439.