

Pengaruh Substitusi Abu Bonggol Jagung sebagai Pozzolan pada Semen Portland Komposit terhadap Kuat Tekan Mortar

Alif Nur Laili Rachmah^{1*}, Binti Ruliana², Sabrianah Badaruddin³, Ratih C F Ratumanan⁴,
Ronald Darlly Hukubun⁵

^{1,3}Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Pattimura, Ambon, Indonesia

²PT. Vale Indonesia, Sorowako, Sulawesi Selatan, Indonesia

⁴Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Pattimura, Ambon, Indonesia

⁵Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan & Ilmu Kelautan, Universitas Pattimura, Ambon, Indonesia

Email: ^{1*}alif.rachmah@lecturer.unpatti.ac.id, ²rulianabinti@gmail.com,

³sabrianah.badaruddin@lecturer.unpatti.ac.id, ⁴ratih.ratumanan@lecturer.unpatti.ac.id,

⁵ronalddarlly@gmail.com

Abstract

The effect of additive corn cob ash (CA) on Portland Composite Cement (PCC) on the compressive strength of the mortar is influenced by pozzolan. The material that makes up pozzolan is silica. Corn cobs are agricultural waste that contains silica and every year continue to increase, so corn cob waste is as an additional material to Portland Composite Cement (PCC). This study was conducted to determine the compressive strength value of mortar using additive corn cob ash (CA) and corn cob ash that has been washed with HCl 2N (CA) and the feasibility of these additives as a PCC-type cement mixture. The weight percentages of additives used were 5%, 10%, and 15%, and the duration of the mortar compressive strength test was 3, 7, and 28 days. The experimental results showed that the compressive strength (σ_m) was highest at the addition of 5% additives, the effect of additives on compressive strength resulted in σ_m research > standard σ_m (SNI). The results of the activation index analysis obtained additive corn cob ash of 76% and corn cob ash+HCl 2N of 76.71%, the value is above the minimum limit according to ASTM C.618-99 which is 75%.*

Keywords: Additive, Corn Cob Ash, Compressive Strength, Mortar, PCC.

Abstrak

Pengaruh additive corn cob ash (CA) Pada Portland Composite Cement (PCC) terhadap kuat tekan dari mortar dipengaruhi oleh pozzolan. Material penyusun pozzolan yaitu silika. Bonggol jagung merupakan limbah pertanian yang mengandung silika dan tiap tahunnya terus meningkat, sehingga untuk mengurangi limbah bonggol jagung ialah sebagai bahan tambahan pada Portland Composite Cement (PCC). Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui nilai kuat tekan mortar dengan menggunakan additive corn cob ash (CA) dan corn cob ash yang telah dicuci dengan HCl 2N (CA*) dan kelayakan additive tersebut sebagai campuran semen tipe PCC. Persentase berat additive yang digunakan adalah 5%, 10%, 15%, dan lama pengujian kuat tekan mortar pada 3, 7, dan 28 hari. Hasil percobaan menunjukkan bahwa kuat tekan (σ_m) tertinggi pada penambahan 5% additive, pengaruh additive terhadap kuat tekan menghasilkan σ_m penelitian > σ_m standar (SNI). Hasil analisis indeks aktivasi didapatkan additive corn cob ash sebesar 76% dan corncobs ash+HCl 2N sebesar 76.71%, nilai tersebut di atas batas minimum menurut ASTM C.618-99 yaitu 75%.

Kata Kunci: Abu Bonggol Jagung, Aditif, Kuat Tekan, Mortar, PCC.

1. PENDAHULUAN

Semen merupakan salah satu bahan konstruksi utama yang berfungsi sebagai perekat dalam pembuatan mortar dan beton. Komponen ini bekerja dengan menyatukan agregat halus (pasir), agregat kasar (kerikil), dan air untuk membentuk material padat

yang memiliki daya tahan tinggi terhadap beban struktural. Bahan utama penyusun semen meliputi kapur (CaO), silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan oksida besi (Fe_2O_3). Ketika dicampur dengan air, semen mengalami proses kimia yang disebut hidrasi, menghasilkan pasta yang plastis dan mudah dibentuk. Seiring waktu, pasta ini akan mengeras dan mulai menunjukkan kekuatan tekan sebagai indikator awal dari performa strukturalnya (Oyewole et al., 2023). Kekuatan tekan merupakan salah satu parameter kunci dalam menilai kualitas mortar atau beton. Parameter ini digunakan untuk mengetahui seberapa besar kemampuan suatu material dalam menahan beban sebelum mengalami kerusakan atau kehancuran. Mortar sebagai produk campuran semen, air, dan pasir dalam proporsi tertentu, memiliki fungsi penting dalam pekerjaan pasangan batu dan plesteran. Kualitas mortar sangat dipengaruhi oleh komposisi bahan penyusunnya, termasuk bahan tambahan yang digunakan (Murthi et al., 2020).

Saat ini, industri konstruksi mulai mengarah pada pemanfaatan bahan tambahan (aditif) berbasis pozzolan dalam campuran semen. Pozzolan merupakan material silikat atau aluminosilikat yang bersifat reaktif terhadap kalsium hidroksida dalam kondisi basah. Reaksi antara pozzolan dan kalsium hidroksida menghasilkan senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H), yang berperan dalam peningkatan kekuatan dan ketahanan mortar. Penggunaan pozzolan dalam industri konstruksi juga dianggap sebagai solusi yang mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan, terutama jika material pozzolan berasal dari limbah atau sumber daya terbarukan. Salah satu material aditif yang umum digunakan adalah silika, yang merupakan senyawa terbanyak kedua di kerak bumi setelah oksigen. Silika memiliki kemampuan untuk bereaksi dengan senyawa kapur bebas hasil hidrasi semen dan membentuk senyawa yang meningkatkan kekuatan mortar maupun beton (Azizah et al., 2022). Dalam hal ini, semakin tinggi kandungan silika pada bahan aditif, maka potensi peningkatan kekuatan tekan mortar akan semakin besar. Namun demikian, harga pozzolan komersial di pasaran saat ini masih tergolong tinggi. Kondisi ini memberikan tekanan terhadap biaya produksi di sektor konstruksi, khususnya untuk proyek skala besar (A. N.L. Rachmah et al., 2022).

Permasalahan tersebut mendorong dilakukannya berbagai kajian untuk menemukan sumber pozzolan alternatif yang memiliki kandungan silika tinggi, harga terjangkau, dan tersedia dalam jumlah melimpah. Salah satu limbah pertanian yang menunjukkan potensi tersebut adalah bonggol jagung. Bonggol jagung merupakan sisa panen tanaman jagung yang jumlahnya terus meningkat setiap tahun seiring dengan meningkatnya produksi jagung nasional. Limbah ini pada umumnya belum dimanfaatkan secara optimal dan sebagian besar hanya dibuang atau dibakar, sehingga menimbulkan dampak lingkungan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa abu bonggol jagung atau *corn cob ash (CA)* memiliki kandungan silika yang tinggi, yaitu sebesar 74,56%. Kandungan ini menjadikan abu bonggol jagung sebagai bahan aditif potensial yang dapat menggantikan peran pozzolan komersial dalam campuran mortar. Selain itu, ketersediaannya yang melimpah dan sifatnya yang terbarukan memberikan nilai tambah dari segi ekonomi dan ekologi (Mascik et al., 2023). Penggunaan CA dalam mortar juga sejalan dengan prinsip circular economy, yakni pemanfaatan limbah menjadi produk bernilai guna tinggi. Namun, penerapan abu bonggol jagung sebagai bahan tambahan dalam mortar masih memerlukan kajian lebih lanjut, khususnya mengenai pengaruhnya terhadap kekuatan tekan mortar. Kajian tentang variasi komposisi abu bonggol jagung dalam campuran semen dan hubungannya dengan sifat mekanik mortar masih terbatas di literatur. Oleh karena itu, penelitian ini penting untuk mengisi kekosongan tersebut dan memberikan data ilmiah yang akurat terkait pemanfaatan limbah pertanian dalam bidang material konstruksi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi penambahan abu bonggol

jagung terhadap σ m kekuatan tekan mortar (kg/cm^2). Komposisi CA yang digunakan divariasikan untuk melihat sejauh mana pengaruhnya terhadap kekuatan tekan mortar pada umur pengerasan tertentu.

Dengan demikian, dapat diperoleh formulasi campuran mortar yang optimal dengan memanfaatkan limbah pertanian sebagai bahan tambahan yang ekonomis dan ramah lingkungan. Kebaruan dari penelitian ini terletak pada pemanfaatan abu bonggol jagung sebagai pozzolan alternatif yang masih jarang digunakan dalam bidang konstruksi. Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih banyak menggunakan bahan lain seperti abu sekam padi, fly ash, atau metakaolin. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan bahan bangunan alternatif berbasis limbah lokal serta mendukung terciptanya inovasi yang berkelanjutan dalam sektor konstruksi di Indonesia. Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat tercipta pendekatan baru dalam produksi mortar yang lebih efisien dari segi biaya, berkinerja baik dari sisi teknis, serta berkontribusi terhadap pengelolaan limbah pertanian yang lebih bijak dan berkelanjutan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Preparasi Abu Bonggol Jagung

Bonggol jagung diperoleh dari limbah pertanian di Kota Malang dan dikeringkan di udara terbuka untuk mengurangi kadar air. Setelah kering merata, dilakukan pembakaran dalam tungku muffle pada suhu 650°C selama satu jam. Tujuan pembakaran ini adalah menghilangkan zat organik dan menghasilkan abu dengan kandungan silika amorf tinggi yang bersifat pozzolanik. Abu yang dihasilkan digiling dan diayak menggunakan saringan 200 mesh untuk mendapatkan ukuran partikel halus ($\leq 75\ \mu\text{m}$), guna memastikan pencampuran homogen dalam mortar. Ukuran partikel yang kecil penting untuk mendukung interaksi kimia antara aditif dan pasta semen selama hidrasi. Selanjutnya, abu menjalani proses treatment kimia menggunakan larutan HCl 2N selama 2 jam untuk menghilangkan pengotor logam seperti Fe, Ca, dan K. Setelah dicuci hingga pH netral dan dikeringkan kembali, abu yang telah ditreatment ini menunjukkan kemurnian silika yang lebih tinggi dan reaktivitas pozzolanik yang meningkat. Peningkatan kualitas abu biomassa setelah acid leaching, sehingga lebih efektif dalam pembentukan senyawa C-S-H pada mortar. Dengan metode ini, abu bonggol jagung hasil pembakaran dan treatment HCl memenuhi kriteria sebagai bahan pozzolan alternatif yang ramah lingkungan dan ekonomis (Nofrisal & Rantesalu, 2020).

2.2 Pencampuran dan Pembuatan Mortar

Mortar disiapkan dengan menggantikan 5% dari berat semen Portland Komposit (PCC) menggunakan abu bonggol jagung (CA), baik tanpa maupun dengan perlakuan HCl (CA*). Penambahan ini bertujuan mengevaluasi pengaruh additive terhadap performa mortar dari aspek kekuatan mekanik dan struktur mikro. Bahan lain yang digunakan meliputi pasir silika sebagai agregat halus dan air sebagai media hidrasi. Komposisi disesuaikan untuk menghasilkan kelecakan (flowability) sebesar $110 \pm 5\ \text{mm}$ sesuai standar SNI 03-6882-2002 untuk mortar segar. Seluruh bahan kering dicampur menggunakan mixer mekanik hingga homogen. Air kemudian ditambahkan secara bertahap sambil diaduk hingga diperoleh konsistensi adonan yang merata dan tidak menggumpal. Campuran dituangkan ke dalam cetakan kubus berukuran $50 \times 50 \times 50\ \text{mm}$ dan dipadatkan melalui getaran ringan untuk mencegah terbentuknya rongga udara yang dapat memengaruhi hasil uji kuat tekan. Setelah didiamkan selama 24 jam di suhu ruang

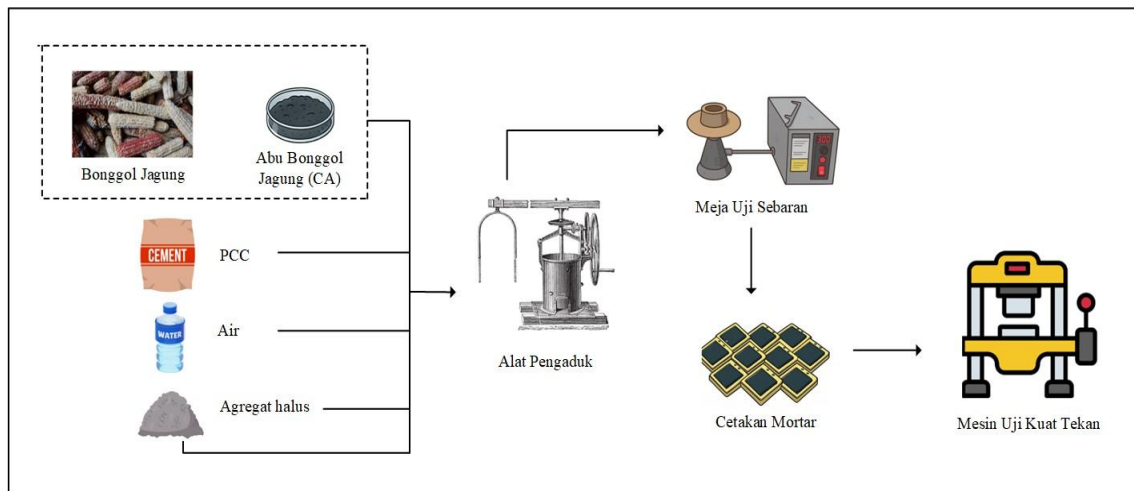
($\pm 27^\circ\text{C}$) untuk pengerasan awal, spesimen dilepas dari cetakan dan direndam dalam air bersih untuk proses curing selama 3, 7, dan 28 hari. Perendaman ini bertujuan memastikan reaksi hidrasi berlangsung optimal. Seluruh tahap dilakukan secara konsisten untuk menjaga keseragaman kondisi dan validitas pengujian antar sampel. Prosedur ini mengacu pada panduan ASTM C109/C109M sebagai acuan metode uji kuat tekan mortar (Nofrisal & Rantesalu, 2020).

2.3 Pengujian Kuat Tekan Mortar

Setelah dilepaskan dari cetakan, spesimen mortar direndam dalam air bersuhu ruang untuk proses curing hingga mencapai usia pengujian, yaitu pada hari ke-3, ke-7, dan ke-28. Pengujian kuat tekan dilakukan menggunakan mesin uji universal yang telah dikalibrasi, sesuai prosedur ASTM C109/C109M. Nilai kuat tekan ditentukan berdasarkan perbandingan antara beban maksimum yang dapat ditahan spesimen (dalam Newton) dengan luas penampang tekan spesimen (dalam mm^2), menggunakan rumus:

$$\sigma_m = \frac{F}{A} \quad \left(\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right)$$

di mana F adalah Beban maksimum dan A adalah Luas penampang benda uji. Untuk menjamin akurasi hasil, setiap pengujian dilakukan pada tiga spesimen per variabel (triplikat), dan nilai rata-rata dari ketiganya digunakan sebagai data akhir (Azizah et al., 2022). Hasil pengujian ini kemudian dibandingkan dengan standar nasional Indonesia untuk menilai kelayakan penggunaan abu bonggol jagung sebagai bahan substitusi semen.



Gambar 1. Alur proses pembentukan dan pengujian kuat tekan substitusi abu bonggol jagung pada mortar

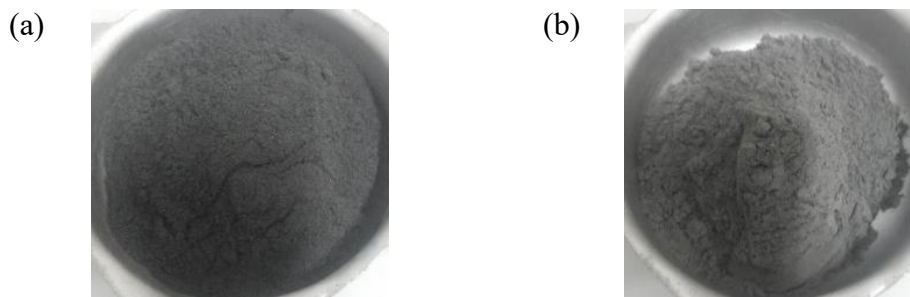
2.4 Desain Eksperimen

Penelitian ini menggunakan desain faktorial penuh (*full factorial design*) dengan bantuan perangkat lunak Minitab 18 untuk mengevaluasi pengaruh dua faktor, yaitu Waktu (3, 7, dan 28 hari) dan Jumlah Aditif CA (5%, 10%, dan 15%) terhadap kuat tekan (Kg/cm^2). Terdapat 9 kombinasi perlakuan, masing-masing direplikasi tiga kali, sehingga total terdapat 27 unit percobaan. Sebelum analisis, data diuji asumsi homogenitas varians menggunakan uji Levene. Analisis dilakukan menggunakan *General Linear Model* (GLM) untuk mengidentifikasi pengaruh utama dan interaksi antar faktor, dilanjutkan dengan uji Tukey sebagai analisis post-hoc untuk mengetahui perbedaan signifikan antar level perlakuan (Wirawasista et al., 2025).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Awal Abu Bonggol Jagung

Abu bonggol jagung yang digunakan sebagai material aditif dalam penelitian ini terdiri dari dua jenis, yaitu abu tanpa perlakuan (CA) dan abu dengan perlakuan awal (CA*). Perlakuan dengan cara merendam abu dalam larutan HCl 2N selama 24 jam untuk mengurangi kadar pengotor, terutama logam alkali dan garam yang dapat mempengaruhi reaktivitas abu. Kedua jenis abu kemudian dikalsinasi pada suhu 650°C selama 1 jam, dan disaring menggunakan ayakan berukuran 0,112 mm. Hasil dari proses ini adalah abu halus yang diharapkan memiliki kandungan silika aktif (SiO₂) dan kalsium oksida (CaO) yang cukup tinggi, yang merupakan komponen utama dalam reaksi pozzolanik. Berikut merupakan penyajian morfologi additive *Corncoobs Ash* yang telah dilakukan screening, dan *Corncoobs Ash* yang telah dilakukan pretreatment penambahan HCl.

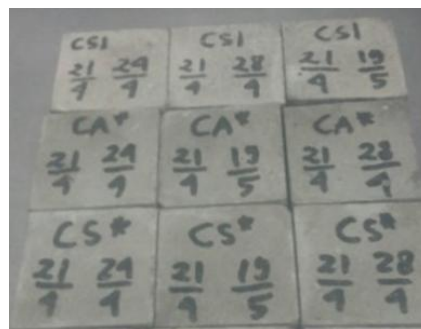


Gambar 2. Preparasi additive (a) *Corncoobs Ash* (CA); (b) *Corncoobs Ash* + HCl (CA*)

Secara makroskopik, tampak bahwa CA* memiliki permukaan yang lebih halus dan homogen dibanding CA, yang menunjukkan bahwa perlakuan HCl memberikan dampak signifikan dalam memodifikasi tekstur material. Perlakuan asam meningkatkan reaktivitas pozzolan melalui penghilangan fraksi karbon dan pengotor lainnya (Soamole et al., 2022)

3.2 Evaluasi Proses Pembuatan Mortar

Additive diperoleh dari hasil pembakaran bonggol jagung pada suhu 650 °C selama 1 jam, kemudian dilakukan proses *screening* hingga berukuran 0,112 mm. Khusus untuk CA*, material dicuci menggunakan larutan HCl 2N guna menghilangkan pengotor logam berat dan meningkatkan kemurnian silika. Additive CA dan CA* kemudian digunakan dalam campuran mortar dengan variasi komposisi 5%, 10%, dan 15%, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Pemilihan persentase ini didasarkan pada batasan aditif pozzolan dalam SNI 15-7064-2014, yaitu antara 6%–35% untuk semen tipe PCC. Berikut gambar 3 merupakan Mortar yang dicetak dan dikondisikan untuk uji lanjut.



Gambar 3. Mortar yang telah di cetak

Mortar dengan campuran additive memperlihatkan permukaan yang relatif padat dan sedikit retakan, menunjukkan bahwa penambahan bahan aditif mampu meningkatkan densitas dan mengurangi cacat permukaan. Secara visual, mortar dengan campuran abu bonggol jagung yang telah mengalami perlakuan awal (CA*) cenderung lebih seragam dibandingkan dengan yang hanya menggunakan abu bonggol jagung biasa (CA), menandakan bahwa proses *pretreatment* menggunakan HCl berpotensi meningkatkan kemampuan dispersi partikel dalam pasta semen. Kondisi ini dapat berkontribusi pada peningkatan ikatan antarfasenya serta efisiensi hidrasi semen, karena permukaan aditif yang telah teraktivasi kimia dapat memberikan titik nucleation tambahan bagi pembentukan produk hidrasi seperti C-S-H (calcium silicate hydrate). Additive yang mengalami *pretreatment* kimia cenderung membentuk ikatan antarmolekul lebih baik dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hasil hidrasi semen, sehingga struktur mikro mortar menjadi lebih kohesif. Di samping itu, meningkatnya homogenitas campuran berimplikasi langsung terhadap kestabilan dimensi dan ketahanan jangka panjang mortar, terutama ketika digunakan dalam lingkungan lembap atau bersifat agresif. Beberapa studi terdahulu juga menunjukkan bahwa additive berbasis biomassa yang telah diproses secara kimia mampu memperbaiki mikrostruktur serta menurunkan porositas total, yang pada gilirannya meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi air dan ion klorida (Aladin et al., 2021; Alif Nur Laili Rachmah et al., 2023).

3.3 Hasil Uji Kuat Tekan Mortar

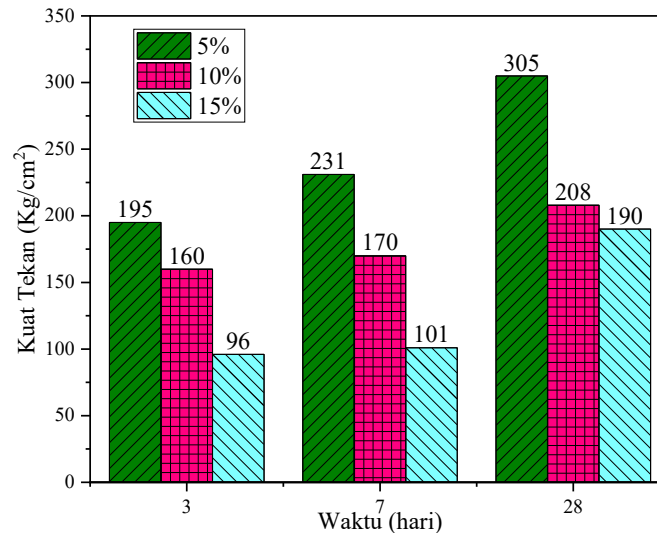
Hasil uji kuat tekan mortar pada berbagai variasi persen abu bonggol jagung (5%, 10%, dan 15%) dan waktu pengujian (3, 7, dan 28 hari) ditampilkan pada Tabel 1 dan Gambar 1. Nilai rata-rata kuat tekan menunjukkan adanya pengaruh signifikan dari kedua variabel tersebut terhadap performa mortar.

Tabel 1. Hasil Uji Kuat Tekan Mortar

Waktu (hari)	Additive (%)	Kuat Tekan (Kg/cm^2)			
		1	2	3	Rata-rata
3	5	190	194	201	195
	10	169	147	164	160
	15	93	95	97	95
7	5	230	224	239	231
	10	172	170	168	170
	15	102	97	104	101
28	5	302	305	308	305
	10	207	205	212	208
	15	193	186	191	190

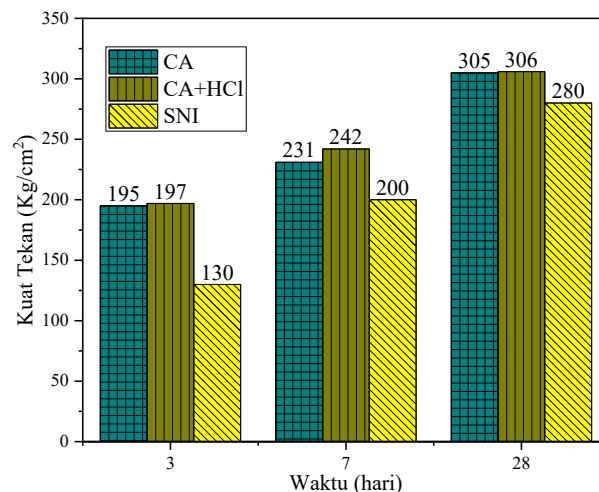
Hasil uji kuat tekan mortar pada umur 3, 7, dan 28 hari ditampilkan dalam Tabel 1. Data menunjukkan bahwa penambahan abu bonggol jagung (additive) mempengaruhi nilai kuat tekan mortar secara signifikan. Pada umur 3 hari, kuat tekan tertinggi dicapai oleh mortar dengan 5% additive yaitu sebesar 195 kg/cm^2 . Sementara itu, mortar dengan 10% dan 15% additive mengalami penurunan kekuatan menjadi 160 kg/cm^2 dan 95 kg/cm^2 secara berturut-turut. Pada umur 7 hari, tren serupa masih terlihat. Mortar dengan 5% additive menunjukkan nilai tertinggi sebesar 231 kg/cm^2 . Sementara itu, kuat tekan mortar dengan 10% dan 15% additive menurun menjadi 170 kg/cm^2 dan 101 kg/cm^2 . Penurunan ini dapat disebabkan oleh penurunan kadar semen aktif akibat penambahan abu yang terlalu tinggi. Pada umur 28 hari, nilai kuat tekan mortar dengan 5% additive mencapai 305 kg/cm^2 , yang merupakan nilai tertinggi dibanding variasi lainnya. Adapun mortar dengan 10% dan 15% additive menunjukkan peningkatan dibandingkan hari ke-

7, tetapi tetap lebih rendah dari 5%, masing-masing sebesar 208 kg/cm² dan 190 kg/cm². Secara keseluruhan, nilai rata-rata kuat tekan dari tabel menunjukkan bahwa penambahan 5% additive memberikan hasil yang paling optimal dibanding variasi lainnya pada semua umur pengujian.



Gambar 4. Hasil kuat tekan terhadap jumlah *additive* CA

Gambar 4 menyajikan grafik batang rata-rata kuat tekan mortar berdasarkan variasi additive dan waktu pengujian. Visualisasi ini memperjelas perbandingan antar variasi additive pada setiap umur mortar. Pada grafik terlihat bahwa mortar dengan 5% additive konsisten menunjukkan nilai kuat tekan tertinggi pada semua umur pengujian (3, 7, dan 28 hari). Nilai kuat tekan meningkat seiring waktu, yang mengindikasikan adanya proses hidrasi semen dan kontribusi pozolan sekunder dari abu bonggol jagung. Grafik juga menunjukkan bahwa penggunaan additive di atas 10% tidak memberikan peningkatan signifikan terhadap kekuatan mortar. Bahkan, pada umur 3 dan 7 hari, terdapat penurunan kuat tekan yang cukup tajam pada variasi 15%, menunjukkan bahwa terlalu banyak additive dapat menghambat pembentukan struktur hidrasi semen yang optimal. Secara visual, grafik ini menegaskan bahwa komposisi abu optimum untuk campuran mortar berada pada kadar 5%. Penggunaan di atas 10% cenderung tidak direkomendasikan untuk aplikasi yang memerlukan kekuatan struktural tinggi.



Gambar 5. Hasil pengujian kuat tekan dengan jenis *additive*

Pada gambar 5 diatas mnjelakan perbandingan hasil pengujian kuat tekan mortar setelah penambahan additive *Corncoobs Ash* (CA) biasa dan CA yang telah melalui proses *pretreatment* menggunakan larutan HCl (CA*), sesuai dengan metode pengujian berdasarkan standar SNI 15-7064-2014. Tujuan utama dari penambahan additive ini pada Portland Composite Cement (PCC) adalah untuk meningkatkan kekuatan tekan mortar sekaligus mengurangi proporsi penggunaan klinker dalam campuran semen. Dengan demikian, tidak hanya meningkatkan performa mekanik, namun juga dapat mengarah pada penghematan biaya produksi serta mendukung prinsip keberlanjutan dalam industri konstruksi, karena klinker merupakan komponen paling intensif energi dan menghasilkan emisi CO₂ yang tinggi dalam proses produksinya (Rasidi et al., 2020). Hasil uji kuat tekan (σ_m) yang diperoleh menunjukkan bahwa benda uji dengan penambahan additive CA dan CA* memiliki nilai σ_m lebih tinggi dibandingkan dengan nilai ambang batas minimum yang disyaratkan dalam SNI. Hal ini mengindikasikan bahwa baik CA maupun CA* mampu berperan sebagai bahan substitusi parsial yang efektif, dengan kontribusi nyata terhadap peningkatan kekuatan mekanik mortar. Namun demikian, peningkatan paling signifikan diamati pada mortar yang menggunakan CA*, yang menunjukkan bahwa proses *pretreatment* kimia menggunakan HCl dapat memodifikasi permukaan abu bonggol jagung sehingga lebih reaktif terhadap produk hidrasi semen, seperti C-S-H (calcium silicate hydrate) dan portlandite. Beberapa studi serupa juga menunjukkan bahwa bahan aditif hasil biomassa yang mengalami aktivasi kimia menunjukkan reaktivitas puzzolan yang lebih tinggi, sehingga berkontribusi langsung terhadap pembentukan fasa ikatan baru dalam sistem semen (Aziz et al., 2025; Suherman et al., 2021).

Untuk menilai kelayakan penggunaan additive seperti CA dan CA* dalam penelitian ini, dilakukan pengujian Pozzolanic Activity Index (PAI) untuk memastikan efektivitasnya. Pengujian ini mengukur kemampuan silika dan alumina yang terkandung dalam fly ash untuk bereaksi dengan CaOH, menghasilkan produk yang tidak larut dalam air semen, yang merupakan indikasi dari aktivitas pozzolan. Berdasarkan standar ASTM C.618-99, Pozzolanic Activity Index yang memenuhi kriteria minimum 75% menunjukkan bahwa fly ash dengan additive yang digunakan memiliki potensi yang baik untuk meningkatkan kualitas mortar dalam jangka panjang (Subahar. M, 2021). Indeks aktivasi digunakan untuk mengukur seberapa efektif suatu bahan pozzolan dalam merespons reaksi kimia dengan kapur untuk membentuk senyawa yang memiliki sifat kekuatan tekan yang baik (Amiraliyev et al., 2025). Pada tabel 2 merupakan hasil analisis indeks aktivasi.

Tabel 2. Analisis Indeks Aktivasi

Additive	Strength (kg/cm ²)			Aktivasi (%)
	3D	7D	28D	
<i>Blank</i>	222	235	425	-
Pozzolan	213	225	321	75.53
CA*	219	227	326	76.71
CA	215	225	323	76

Hasil kuat tekan menunjukkan bahwa mortar dengan penambahan *additive* masih memenuhi syarat standar minimum menurut ASTM C618-99, yaitu indeks aktivasi $\geq 75\%$. Hal ini terlihat dari nilai aktivasi *Pozzolan*, *CA*, dan *CA** yang seluruhnya berada di atas ambang batas tersebut. Performa kuat tekan terbaik pada 28 hari diperoleh oleh *Blank* karena tidak mengandung bahan substitusi, namun nilai aktivasi tertinggi dicapai oleh *CA** (76,71%), menandakan bahwa abu bonggol jagung yang telah diaktivasi memiliki potensi reaktivitas tinggi terhadap hidrasi semen. Nilai aktivasi *CA* dan *CA**

yang hampir sebanding dengan pozzolan komersial juga menunjukkan bahwa additive ini dapat dimanfaatkan sebagai alternatif bahan tambahan semen. Aktivasi termal maupun modifikasi kimia pada CA^* kemungkinan meningkatkan kadar silika amorf yang bersifat reaktif, sehingga mampu menghasilkan produk hidrasi sekunder seperti CSH yang turut berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan mortar. Dengan demikian, additive berbasis abu bonggol jagung, terutama yang telah diaktivasi (CA^*), layak dipertimbangkan sebagai substituen parsial pozzolan pada pembuatan semen tipe PCC yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan (Sekaringgalih & Alif Nur Laili Rachmah, 2023; Soamole et al., 2022).

3.4 Analisis Pengaruh Faktor Waktu dan Aditif Abu Bonggol Jagung terhadap Kuat Tekan

Pada penelitian ini, dilakukan pengujian untuk menganalisis pengaruh dua faktor utama, yaitu waktu perendaman dan jumlah aditif, terhadap kuat tekan material. Analisis dilakukan melalui tahapan uji asumsi homogenitas variansi, kemudian dilanjutkan dengan analisis varians apabila asumsi terpenuhi.

3.4.1 Analisis Homogenitas Variasi Menggunakan Uji Levene

Pada tahap ini, uji Levene dilakukan untuk memastikan apakah varians antar kelompok adalah homogen. Langkah awal sebelum melakukan analisis lebih lanjut, seperti ANOVA. Jika hasil uji Levene menunjukkan bahwa varians antar kelompok homogen ($p > 0,05$), maka dapat melanjutkan ke ANOVA. Tabel 3 memperlihatkan nilai standar deviasi dan interval kepercayaan Bonferroni 95% untuk setiap kombinasi waktu perendaman dan persentase aditif (Zweifach, 2025).

Tabel 3. Interval Kepercayaan Bonferroni 95% untuk Deviasi Standar

Waktu (hari)	Jumlah Aditif (%)	N	Standar Deviasi	CI
3	5	3	5,29150	(0,0000025; 149014427)
3	10	3	6,24500	(0,0000029; 175865886)
3	15	3	1,00000	(0,0000005; 28161080)
7	5	3	8,18535	(0,0000038; 230508372)
7	10	3	2,64575	(0,0000012; 74507213)
7	15	3	1,00000	(0,0000005; 28161080)
28	5	3	1,00000	(0,0000005; 28161080)
28	10	3	3,60555	(0,0000017; 101536217)
28	15	3	1,73205	(0,0000008; 48776421)

Tingkat kepercayaan individu = 99,4444%

Terlihat bahwa nilai standar deviasi bervariasi antar perlakuan. Nilai tertinggi terdapat pada perlakuan 5 hari dengan 10% aditif (8,19), menunjukkan adanya fluktuasi data yang lebih besar pada perlakuan ini. Sebaliknya, perlakuan dengan waktu 3 hari dan 10% aditif menunjukkan standar deviasi terendah (1,00), menandakan hasil uji kuat tekan yang relatif seragam. Perbedaan ini menunjukkan bahwa variasi waktu dan aditif dapat memengaruhi kestabilan kuat tekan yang dihasilkan. Tabel 4 menyajikan hasil uji homogenitas variansi menggunakan uji Levene.

Tabel 4. Hasil uji homogenitas variansi menggunakan uji Levene

Method	Test Statistic	P-Value
Multiple comparisons	—	0,157
Levene	0,94	0,511

Nilai *P-Value* sebesar 0,511 ($> 0,05$) menunjukkan bahwa variansi antar kelompok perlakuan adalah homogen. Dengan demikian, asumsi dasar ANOVA terpenuhi sehingga analisis lanjut dapat dilakukan. Hasil ini memperkuat bahwa rancangan percobaan sudah tepat dan data dapat dianalisis lebih mendalam untuk melihat signifikansi pengaruh kedua faktor perlakuan.

3.4.2 Analisis Regresi Faktorial untuk Pengaruh Faktor Waktu dan Jumlah Aditif Bonggol Jagung terhadap Kuat Tekan Maortar

Setelah dipastikan bahwa variansi antar kelompok homogen melalui uji Levene, tahap selanjutnya adalah melakukan analisis varians (ANOVA) untuk menguji pengaruh faktor waktu perendaman dan jumlah aditif terhadap kuat tekan material. ANOVA digunakan untuk mengetahui apakah perbedaan rata-rata antar kelompok perlakuan signifikan secara statistik. Berikut ialah tabel 4 memperlihatkan hasil analisis ANOVA.

Tabel 4. ANOVA Regresi Faktorial untuk Pengaruh Faktor Waktu dan Jumlah Aditif terhadap Kuat Tekan Mortar

Source	DF	Adj SS	Adj MS	Nilai-F	Nilai-P
Model	8	99494,7	12436,8	699,57	0,000
Linear	4	95497,3	23874,3	1342,93	0,000
Waktu (hari)	2	35704,7	17852,3	1004,19	0,000
Jumlah Aditif (%)	2	59792,7	29896,3	1681,67	0,000
2-Way Interactions	4	3997,3	999,3	56,21	0,000
Waktu (hari)*Jumlah Aditif (%)	4	3997,3	999,3	56,21	0,000
Error	18	320,0	17,8		
Total	26	99814,7			

Hasil analisis varians (ANOVA) yang lebih detail, mencakup pengaruh faktor utama, interaksi, dan error. Berdasarkan tabel, baik faktor waktu perendaman, jumlah aditif, maupun interaksi keduanya berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan, ditunjukkan oleh nilai *P-Value* yang semuanya 0,000 ($< 0,05$). Nilai *F-Value* yang tinggi, terutama pada faktor jumlah aditif (1681,67) dan waktu (1004,19), menegaskan bahwa kedua faktor tersebut memberikan kontribusi dominan terhadap variasi kuat tekan. Selain itu, interaksi antara waktu dan jumlah aditif juga signifikan (*F-Value* 56,21), menunjukkan bahwa pengaruh kedua faktor saling terkait. Secara keseluruhan, hasil ANOVA ini mendukung bahwa kombinasi waktu perendaman dan jumlah aditif yang tepat sangat berpengaruh dalam menentukan kuat tekan optimum.

Ringkasan statistik dari model ANOVA. Nilai koefisien determinasi (*R-sq*) sebesar 95,67% mengindikasikan bahwa model mampu menjelaskan 95,67% variasi yang terjadi pada data kuat tekan. Nilai *R-sq(adj)* sebesar 94,89% menunjukkan nilai penyesuaian untuk jumlah variabel prediktor, sedangkan *R-sq(pred)* sebesar 93,49% menandakan kemampuan model dalam memprediksi data baru. Nilai standard error of the regression (S) sebesar 14,0087 menunjukkan deviasi rata-rata hasil pengamatan dari nilai prediksi model. Nilai *R-sq* yang tinggi menunjukkan bahwa model memiliki keakuratan yang baik untuk digunakan sebagai dasar prediksi. Berikut ialah Persamaan Regresi dari percobaan ini (A. N.L. Rachmah et al., 2022; Wirawasista et al., 2025).

$$\begin{aligned} \text{Kuat Tekan (Kg/cm}^2\text{)} &= 183,89 - (33,89 \cdot \text{Waktu_3}) - (16,56 \cdot \text{Waktu_7}) + (50,44 \cdot \text{Waktu_28}) \\ &\quad + (59,78 \cdot \text{Jumlah Aditif_5}) - (4,56 \cdot \text{Jumlah Aditif_10}) - \\ &\quad (55,22 \cdot \text{Jumlah Aditif (\%)_15}) \end{aligned}$$

Persamaan regresi menunjukkan bahwa waktu perendaman 28 hari memberikan pengaruh positif paling besar terhadap peningkatan kuat tekan, sedangkan perendaman 3 dan 7 hari justru menurunkan kuat tekan. Pada faktor aditif, penambahan 5% aditif meningkatkan kuat tekan secara signifikan, namun penambahan hingga 10% dan 15% malah menurunkan nilai kuat tekan. Hal ini menegaskan bahwa semakin lama waktu perendaman dan penggunaan aditif pada kadar optimum diperlukan untuk menghasilkan kuat tekan material yang maksimal.

3.5 Analisis Statistika Lanjut (Uji Post-Hoc) Metode Tukey

Setelah ANOVA menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan, langkah selanjutnya adalah uji lanjut (post-hoc) untuk mengetahui secara spesifik kelompok mana yang berbeda nyata. Pada penelitian ini digunakan uji Tukey untuk membandingkan rata-rata kuat tekan antar kelompok waktu perendaman.

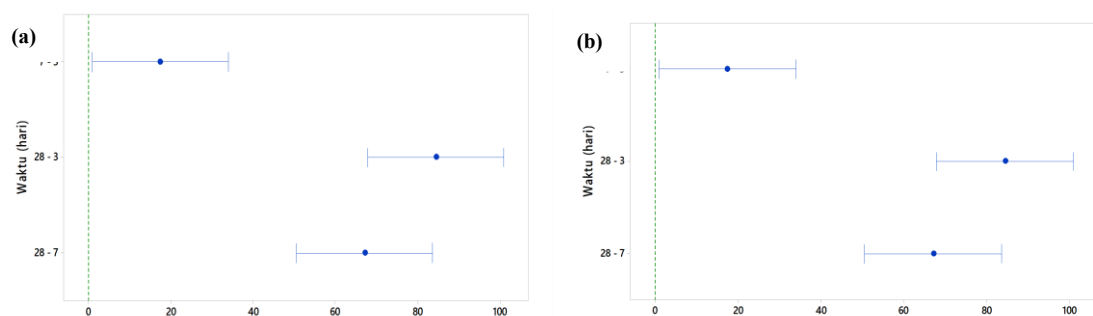
Tabel 6 Perbandingan Tukey dan Pengelompokan Metode Tukey terhadap Waktu

Waktu (hari)	N	Rata-Rata	Kelompok
28	9	234,333	A
7	9	167,333	B
3	9	150,000	C

Tabel 7 Perbandingan Tukey dan Pengelompokan Metode Tukey terhadap Jumlah Aditif

Jumlah Aditif (%)	N	Rata-Rata	Kelompok
5	9	243,667	A
10	9	179,333	B
15	9	128,667	C

Hasil uji lanjut menggunakan metode Tukey HSD pada Tabel 6 menunjukkan bahwa waktu perendaman 28 hari menghasilkan rata-rata kuat tekan tertinggi, yaitu 234,333 kg/cm², berbeda signifikan dibanding waktu perendaman 7 hari (167,333 kg/cm²) dan 3 hari (150,000 kg/cm²). Pengelompokan huruf A, B, dan C membuktikan bahwa setiap perlakuan berada pada kelompok yang berbeda nyata secara statistik. Sementara itu, Tabel 7 memperlihatkan perbandingan pada faktor jumlah aditif. Penambahan 5% aditif menghasilkan kuat tekan tertinggi (243,667 kg/cm²) dan berbeda signifikan dengan perlakuan 10% (179,333 kg/cm²) dan 15% (128,667 kg/cm²). Sama halnya, pengelompokan menunjukkan bahwa setiap level aditif berada pada kelompok berbeda (A, B, C). Hasil ini mengkonfirmasi bahwa semakin lama waktu perendaman dan dosis aditif yang tepat (5%) berpengaruh nyata dalam meningkatkan kuat tekan material. Sebaliknya, dosis aditif berlebih justru menurunkan kuat tekan.



Gambar 6. (a) Grafik Interval 95% Tukey Kuat Tekan berdasarkan Waktu; (b) Grafik Interval 95% Tukey Kuat Tekan berdasarkan Jumlah Aditif

Grafik Tukey Simultaneous 95% Confidence Intervals mendukung hasil tabel, di mana interval kepercayaan ketiga kelompok tidak saling tumpang tindih, menegaskan perbedaan yang signifikan antar perlakuan. Secara keseluruhan, hasil uji lanjut ini membuktikan bahwa perendaman selama 28 hari menghasilkan kuat tekan tertinggi dan berbeda nyata dibanding waktu perendaman yang lebih pendek. Dengan demikian, waktu perendaman yang lebih lama terbukti lebih efektif untuk meningkatkan kuat tekan material (Agbangba et al., 2024).

4. KESIMPULAN

Penambahan abu bonggol jagung (CA) dan yang telah dicuci dengan HCl 2N (CA*) sebesar 5% dari berat semen menghasilkan kuat tekan mortar yang melebihi standar SNI 15-7064-2014. Indeks aktivitas pozolan sebesar 76% (CA) dan 76,71% (CA*) juga melampaui batas minimum ASTM C618-99, yang menegaskan potensi keduanya sebagai bahan tambahan aktif. Secara ilmiah, penelitian ini menunjukkan bahwa limbah pertanian seperti bonggol jagung dapat diolah menjadi material tambahan yang ramah lingkungan. Hal ini berkontribusi untuk mengurangi konsumsi klinker dan menurunkan emisi karbon pada industri semen, yang sangat relevan dalam konteks keberlanjutan industri konstruksi. Dari sisi ekonomi dan industri, ketersediaan abu bonggol jagung yang melimpah, biaya rendah, dan proses pengolahan yang sederhana menjadikannya alternatif bahan tambah yang layak secara komersial, terutama di wilayah pertanian. Potensi ini membuka peluang untuk menurunkan biaya produksi serta mendukung industri berbasis ekonomi sirkular. Namun, untuk memastikan implementasi di industri, dibutuhkan penelitian lanjutan terkait daya tahan jangka panjang dari bahan ini, standar mutu pada skala besar, serta analisis kelayakan ekonomi yang lebih mendalam untuk memastikan keberlanjutan dan implementasi praktis di industri semen.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan selama proses penelitian ini berlangsung.

REFERENCES

- Agbangba, C. E., Sacla Aide, E., Honfo, H., & Glèlè Kakai, R. (2024). On the use of post-hoc tests in environmental and biological sciences: A critical review. *Heliyon*, 10(3), e25131. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25131>
- Aladin, A., Syarif, T., Darnengsih, D., Badaruddin, S., & Ridwan, N. (2021). Pengaruh Waktu Perendaman Terhadap Daya Awet Ikan Katombong Dalam Larutan Asap Cair Tongkol Jagung Grade 1 Hasil Pirolisis. *Journal of Chemical Process Engineering*, 6(2), 118–123. <https://doi.org/10.33536/jcpe.v6i2.1044>
- Amiraliyev, B., Taimasov, B., Potapova, E., & Sarsenbayev, B. (2025). *The Use of Clay Shales as Active Mineral Additives for the Production of Composite Cements*. 0–26. <https://doi.org/10.20944/preprints202504.1746.v1>
- Aziz, A. A., Nassar, H. F., Al-Shemy, M. T., & Mohamed, O. A. (2025). Boosting the mechanical performance and fire resistivity of white ordinary portland cement pastes via biogenic mesoporous silica nanoparticles. *Scientific Reports*, 15(1), 2909. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86798-y>

- Azizah, T., Wahyuni, A. S., Gunawan, A., & Afrizal, Y. (2022). Pengaruh Penggunaan Abu Terbang (Fly Ash) Sebagai Bahan Tambah Terhadap Kuat Tekan Mortar. *J. Inersia*, 14(1), 28–34. <https://ejournal.unib.ac.id/index.php/inersiajurnal>
- Mascik, D. perayuda, S Suzen, Z., & Ary W, I. (2023). Pengaruh Salinitas Pasir Terhadap Kuat Tekan Bata. *Jurnal Inovasi Teknologi Terapan*, 1(1), 77–83. <https://doi.org/10.33504/jitt.v1i1.80>
- Murthi, P., Poongodi, K., & Gobinath, R. (2020). Effects of Corn Cob Ash as Mineral Admixture on Mechanical and Durability Properties of Concrete - A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1006(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1006/1/012027>
- Nofrisal, N., & Rantesalu, S. (2020). Pengaruh Abu Terbang (Fly Ash) Pltu Sekayan Sebagai Substitusi Pengganti Sebagian Semen Pada Juat Tekan Mortar. *Jurnal Borneo Saintek*, 3(1), 19–27. https://doi.org/10.35334/borneo_saintek.v3i1.1406
- Oyewole, M. D., Mewomo, M. C., & Toyin, J. O. (2023). Utilization of Corncob Ash as a Partial Replacement of Cement in Concrete: A Review. *International Conference on Construction in the 21st Century, 2023-May*(September).
- Rachmah, A. N.L., Fatmawati, A., & Widjaja, A. (2022). Impact of surfactant-aided subcritical water pretreatment process conditions on the reducing sugar production from oil palm empty fruit bunch. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 963(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/963/1/012005>
- Rachmah, Alif Nur Laili, Sekaringgalih, R., Ruliana, B., & Ansori, A. (2023). Bioethanol From Cheese Waste (Whey) Using *Kluyveromyces Marxianus*. *Jurnal Inovasi Pendidikan Dan Sains*, 4(3), 167–171. <https://doi.org/10.51673/jips.v4i3.1799>
- Rasidi, N., Rochman, T., Sumardi, S., & Purnomo, F. (2020). Structural behavior of lightweight interlocking brick system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 732(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/732/1/012026>
- Sekaringgalih, R., & Alif Nur Laili Rachmah. (2023). Treatment of the Gelatin Wastewater With Ozone Peroxide Advanced Oxidation Process. *Menara: Jurnal Teknik Sipil*, 18(2), 130–137. <https://doi.org/10.21009/jmenara.v18i2.35143>
- Soamole, A., Sultan, M. A., & Tata, A. (2022). Efek Pemanasan Terhadap Kuat Tekan Mortar Semen Dengan Penambahan Fly Ash. *Jurnal Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil (JRKMS)*, 05, 1–10. <https://doi.org/10.54367/jrkms.v5i1.1677>
- Subahar, M, P. C. P. J. U. P. (2021). IRJET- Study on Corn Cob Ash Replaced Cement in Concrete by Accelerated Curing. *Irjet*, 8(11), 8.
- Suherman, Kumoro, A. C., Anam, K., Susanto, E. E., & Badaruddin, S. (2021). Development of Effervescent Tablets Based on Red Ginger (*Zingiber Officinale* Rosc. Var. *Rubrum*) and Rosella Flower (*Hibiscus Sabdariffa* L.). *International Journal of Advanced Research*, 9(09), 720–727. <https://doi.org/10.21474/ijar01/13473>
- Wirawasista, H., Gunawan, S., Ibrahim, R., Hariawan, M., Bisyaqil, F., & Farhan, M. (2025). South African Journal of Chemical Engineering Making healthy cooking oil from crude palm oil (CPO) by combination method microwave-assisted extraction (MAE) – Batchwise solvent extraction (BSE). *South African Journal of Chemical Engineering*, 52(February), 311–324. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2025.03.011>
- Zweifach, A. (2025). Bonferroni's correction, not Tukey's, should be used to control the total number of false positives when making multiple pairwise comparisons in experiments with few replicates. *SLAS Discovery*, 35(April), 100253. <https://doi.org/10.1016/j.slasd.2025.100253>