

Karakteristik Mortar Rendah Semen Berbasis Pasir Pantai dengan Ferronickel Slag Powder dan Variasi Vermiculite

Reyvaldi¹, Riskawahyuni¹, Nurul Mutmainnah¹, Elfiranahla Chandra Dewi², Chusla Ramah², Amry Dasar^{1,3}, Dahlia Patah^{1,3*}, Nur Okviyani¹

^{1*}Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sulawesi Barat

²Dept. of Research & Development, PT Semen Indonesia (Persero) Tbk

^{3*}Fakultas Vokasi, Universitas Hasanuddin

*Email: dahlia.patah@gmail.com

Abstract

This study investigates the effect of raw vermiculite content on the density, compressive strength, ultrasonic pulse velocity (UPV), and initial sorptivity of low-cement mortar produced with washed sea sand and ferronickel slag (FNS) powder. Four mixtures were prepared, consisting of one control mixture and three modified mixtures. The control mixture (V0) was produced without FNS powder and vermiculite, whereas V10, V20, and V30 were designed with a constant FNS powder content and increasing raw vermiculite content. In the modified mixtures, Portland Composite Cement (PCC) was reduced by 20%, 30%, and 40%, while the water-to-binder ratio was maintained at 0.37. The experimental program included mortar density, compressive strength at 7 and 28 days, UPV, and initial sorptivity at 28 days. The results showed that increasing raw vermiculite content progressively reduced mortar density from 2237.33 kg/m³ in V0 to 1934.67 kg/m³ in V30. The 28-day compressive strength also decreased from 22.06 MPa in V0 to 12.76 MPa, 7.33 MPa, and 4.57 MPa in V10, V20, and V30, respectively. A similar reduction was observed in UPV, which declined from 3.35 km/s in V0 to 2.49 km/s in V30, indicating reduced matrix continuity. Conversely, initial sorptivity increased with higher vermiculite content, reflecting greater capillary water absorption. These findings imply that raw vermiculite must be carefully controlled in low-cement sea-sand mortar, with V10 providing the most balanced performance for potential lightweight non-structural mortar applications.

Keywords: Ferronickel slag; initial sorptivity; low-cement mortar; sea sand; vermiculite

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh variasi kadar raw vermiculite terhadap densitas, kuat tekan, ultrasonic pulse velocity (UPV), dan initial sorptivity mortar rendah semen yang menggunakan pasir pantai tercuci dan ferronickel slag (FNS) powder. Empat variasi campuran disiapkan, terdiri atas satu campuran kontrol dan tiga campuran modifikasi. Campuran kontrol (V0) dibuat tanpa penambahan FNS powder dan vermiculite, sedangkan V10, V20, dan V30 dibuat dengan kadar FNS powder tetap. Kadar *Portland Composite Cement* (PCC) pada campuran modifikasi dikurangi sebesar 20%, 30%, dan 40%, dengan water-to binder ratio sebesar 37%. Pengujian meliputi densitas mortar, kuat tekan umur 7 dan 28 hari, UPV, serta initial sorptivity pada umur 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar raw vermiculite menurunkan densitas mortar dari 2237,33 kg/m³ pada V0 menjadi 1934,67 kg/m³ pada V30. Kuat tekan umur 28 hari juga menurun dari 22,06 MPa pada V0 menjadi 12,76 MPa, 7,33 MPa, dan 4,57 MPa pada V10, V20, dan V30. Nilai UPV turut menurun dari 3,35 km/s pada V0 menjadi 2,49 km/s pada V30, yang menunjukkan berkurangnya kontinuitas matriks. Sebaliknya, initial sorptivity meningkat seiring bertambahnya kadar vermiculite, yang mengindikasikan peningkatan penyerapan air kapiler. Implikasi penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan raw vermiculite perlu dikontrol secara ketat, dengan V10 sebagai campuran modifikasi paling seimbang untuk aplikasi mortar ringan non-struktural berbasis pasir pantai.

Kata kunci: *Ferronickel slag, initial sorptivity, mortar, pasir pantai, vermiculite*

1. Pendahuluan

Produksi semen menjadi salah satu kontributor emisi CO₂ global sehingga diperlukan strategi optimalisasi pemakaian semen dengan kombinasi material alternatif (SCMs) tanpa mengabaikan kinerja mekanik. [1]. Selain itu, pemanfaatan limbah industri sebagai komponen dalam sistem binder tidak hanya memitigasi jejak karbon, tetapi juga mendukung konsep ekonomi sirkular melalui valorisasi limbah padat sebagai sumber daya sekunder dalam industri konstruksi [2].

Ferronickel slag (FNS) merupakan limbah padat hasil proses peleburan bijih nikel yang tersedia dalam jumlah besar, terutama pada wilayah dengan aktivitas industri feronikel. Secara kimia, FNS umumnya memiliki kandungan SiO₂ dan MgO yang tinggi, namun kandungan CaO relatif rendah. Karakter tersebut membuat FNS memiliki reaktivitas hidraulik yang lebih terbatas dibandingkan semen Portland, tetapi tetap berpotensi digunakan dalam material berbasis semen setelah melalui proses penghalusan [1][2]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa FNS powder dapat digunakan sebagai material pengganti sebagian semen, dengan pengaruh yang bergantung pada tingkat kehalusan, kadar penggantian, dan karakter mineraloginya [3]. Pada kadar tertentu, FNS dapat berkontribusi melalui efek filler dan perbaikan packing partikel, tetapi pada kadar penggantian tinggi efek dilusi dapat menurunkan perkembangan kuat tekan [4][5]. Penggunaan limbah pada beton telah banyak dilakukan dan memberikan efek kekuatan yang baik [6][7][8][9].

Selain FNS, vermiculite juga telah banyak dikaji sebagai material ringan berpori dalam mortar dan beton. Vermiculite memiliki berat jenis rendah, struktur berlapis, serta kemampuan menyerap air yang tinggi. Penggunaan vermiculite, baik dalam bentuk raw maupun expanded, umumnya menurunkan densitas material dan dapat meningkatkan fungsi termal atau insulasi, tetapi sering diikuti oleh penurunan kuat tekan akibat meningkatnya porositas dan melemahnya kontinuitas matriks [10][11][12]. Pada sistem mortar dengan

vermiculite berukuran lebih besar, pengaruhnya terhadap densitas, zona antarmuka, dan jalur pori menjadi lebih dominan dibandingkan kontribusi reaktifnya [13].

Di sisi lain, penggunaan pasir pantai sebagai agregat halus menjadi alternatif yang menarik di wilayah pesisir karena ketersediaannya tinggi dan dapat mengurangi ketergantungan terhadap pasir sungai. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan material laut dalam beton atau mortar masih memerlukan desain campuran yang cermat, terutama jika dikombinasikan dengan SCMs untuk mengurangi porositas dan membatasi transport ion agresif [14][6][15][16][17].

Sebagian besar penelitian sebelumnya mengevaluasi penggunaan FNS sebagai agregat atau bahan pengganti semen secara terpisah, sedangkan vermiculite umumnya dikaji sebagai material ringan untuk menurunkan densitas mortar. Kajian yang mengombinasikan FNS powder, vermiculite, dan pasir pantai pada mortar masih terbatas. Selain itu, hubungan simultan antara reduksi semen, penurunan densitas, kuat tekan, kualitas internal berdasarkan ultrasonic pulse velocity, dan initial sorptivity belum banyak dibahas sebagai satu kerangka *strength-sorptivity trade-off*. Padahal, pemahaman terhadap hubungan tersebut penting untuk menentukan batas teknis penggunaan material ringan berpori dalam mortar. Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini mengevaluasi pengaruh penggunaan FNS powder dengan kadar tetap dan peningkatan kadar vermiculite terhadap densitas, kuat tekan, UPV, dan initial sorptivity mortar berbasis pasir pantai. Variasi campuran dirancang dengan satu campuran kontrol dan tiga campuran modifikasi dengan reduksi PCC sebesar 20%, 30%, dan 40%. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai batas penggunaan vermiculite dalam mortar yang mengandung FNS powder tetap, khususnya untuk aplikasi mortar ringan non-struktural berbasis pasir pantai.

2. Metoda Penelitian

2.1. Material

Semen yang digunakan adalah *Portland Composite Cement* (PCC) merk Tonasa sebagai material semen utama dalam seluruh campuran mortar. Berat jenis PCC yang digunakan adalah $3,08 \text{ g/cm}^3$ dan karakterisasi kimianya sesuai ASTM C114[18].

Ferronickel slag powder (FNS) powder digunakan sebagai material pengganti sebagian semen. FNS diperoleh dari PT Bumi Mineral Sulawesi (PT BMS) di Palopo merupakan sisa hasil pemurnian nikel (Gambar 1). FNS powder ini diproses melalui penggilingan sebanyak 2 kali menggunakan mesin *disk mill* dengan kecepatan 8000 rpm. Berat jenis FNS powder yang digunakan adalah $2,95 \text{ g/cm}^3$. Penggunaan FNS powder dimaksudkan untuk menurunkan konsumsi PCC serta memanfaatkan limbah industri feronikel sebagai material alternatif dalam mortar berbasis semen. Berdasarkan penelitian terdahulu, FNS powder memiliki kandungan SiO_2 dan MgO yang tinggi, tetapi kandungan CaO yang rendah, sehingga kontribusinya dalam sistem semen lebih dominan sebagai filler dan material dengan potensi reaktivitas pozzolan terbatas, bergantung pada tingkat kehalusan dan karakter mineraloginya [3][19].



Gambar 1. Tampilan visual FNS powder dan raw vermiculite

Raw vermiculite yang berukuran 1-2 cm digunakan sebagai material mineral ringan berpori dalam campuran mortar. Sebelum digunakan dalam campuran, vermiculite disiapkan dalam kondisi *saturated surface dry* (SSD) untuk mengurangi pengaruh penyerapan air awal selama proses pencampuran. Vermiculite memiliki berat jenis 1,03 dan daya serap sebesar 29,21%. Komposisi oksida dan

sifat fisik PCC, FNS powder, dan raw vermiculite disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi oksida dan sifat fisik pada PCC, FNS dan vermiculite

Parameter	PCC	FNS powder	Vermiculite
Chemical properties			
SiO_2 , %	24.62	46.12	41.60
Al_2O_3 , %	6.463	6.29	13.38
Fe_2O_3 , %	2.139	9.06	6.29
CaO , %	53.31	3.34	-
SO_3 , %	7.534	0.42	-
MgO , %	1.823	31.34	24.60
LOI, %	2.71	0.71	-
Physical properties			
Berat Jenis	3.08	2.95	1.03

Agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini adalah pasir pantai. Sebelum digunakan, pasir pantai disaring lolos saringan No. 4 dan dicuci terlebih dahulu untuk mengurangi kandungan garam terlarut, partikel halus, dan kontaminan lain yang berpotensi memengaruhi proses hidrasi dan kinerja mortar. Setelah pencucian, pasir pantai disiapkan dalam kondisi SSD. Berat jenis pasir pantai yang digunakan adalah $2,22 \text{ g/cm}^3$. Pengujian berat jenis dan absorpsi agregat halus mengacu pada ASTM C128[20], sedangkan analisis gradasi dilakukan berdasarkan ASTM C136[21]. Berdasarkan hasil analisis gradasi, pasir pantai lolos 100% pada saringan 12,5 mm, 9,5 mm, dan 4,75 mm. Persentase lolos pada saringan 2,36 mm, 1,18 mm, 0,60 mm, 0,30 mm, dan 0,15 mm masing-masing adalah 97,80%, 89,20%, 50,50%, 2,30%, dan 2,30%.

2.2. Proporsi Campuran, Pencetakan dan Perawatan Benda Uji

Empat variasi campuran mortar disiapkan dalam penelitian ini, terdiri atas satu campuran kontrol dan tiga campuran mortar yang mengandung FNS powder dan vermiculite (Tabel 2). Campuran kontrol, V0, dibuat tanpa penambahan FNS powder dan vermiculite. Campuran V10, V20, dan V30 dibuat dengan mempertahankan kadar FNS powder. Variabel utama dalam desain campuran ini adalah peningkatan kadar vermiculite dengan kadar

FNS powder tetap. Pada seluruh campuran, rasio air terhadap total massa PCC, FNS powder, dan raw vermiculite, yaitu w/ (PCC + FNS + vermiculite), dimana FAS dipertahankan sebesar 0,37. Proporsi campuran mortar pasir pantai yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Proporsi campuran mortar

Mix ID	Air	PCC	FNS powder	Vermicu lite	Pasir Pantai	Red uksi PCC (%)
V0	205	554	0	0	1298	0
V10	205	444	55	55	1345	20
V20	205	388	55	111	1327	30
V30	205	333	55	166	1309	40

Proses pencampuran menggunakan mixer 10 L. Bahan yaitu PCC, FNS powder, dan pasir pantai terlebih dahulu dicampur dalam kondisi kering selama 1 menit dalam mixer untuk memperoleh distribusi awal yang merata. Setelah itu, air ditambahkan secara bertahap sambil dilakukan pengadukan pada kecepatan rendah selama 30 detik. Raw vermiculite dimasukkan pada tahap akhir pencampuran untuk mengurangi potensi kerusakan partikel akibat gaya geser mekanis selama proses mixing. Campuran lalu dimix selama 30 detik pada kecepatan tinggi. Setelah tahap pencampuran awal, mortar didiamkan selama 90 detik dan diaduk manual. Selanjutnya, mortar dimix kembali selama 1 menit pada kecepatan tinggi. Campuran segar yang telah selesai dicampur kemudian dicetak menggunakan cetakan kubus baja berukuran $50 \times 50 \times 50$ mm, mengacu pada ASTM C109/C109M[22]. Mortar dimasukkan ke dalam cetakan dalam dua lapisan. Setiap lapisan dipadatkan secara merata untuk meminimalkan udara terperangkap dan memperoleh kepadatan benda uji yang seragam. Permukaan benda uji kemudian diratakan menggunakan alat perata baja. Setelah proses pencetakan, cetakan ditutup menggunakan lembaran plastik untuk mencegah kehilangan kelembapan awal dan dibiarkan mengeras pada kondisi laboratorium selama 20-24 jam. Setelah 20-24 jam, cetakan dilepas dan benda uji segera dipindahkan ke

dalam bak perawatan berisi air tawar. Proses perawatan dilakukan pada suhu 23 ± 2 °C hingga umur pengujian yang telah ditentukan.

2.3. Pengujian

2.3.1. Densitas

Pengujian densitas dilakukan berdasarkan ASTM C642[23]. Pengujian densitas dilakukan pada umur 28 hari. Densitas mortar dihitung berdasarkan perbandingan antara massa benda uji dan volume aktualnya.

2.3.2. Kuat tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan berdasarkan ASTM C109/C109M[22] yang diuji pada umur 7 dan 28 hari menggunakan mesin uji tekan universal kapasitas maksimum 3000 kN. Pembebanan diberikan secara kontinu dengan laju 2,4 kN/s hingga benda uji mengalami keruntuhan. Kuat tekan mortar dihitung dari 3 rata-rata benda uji berdasarkan perbandingan antara beban maksimum yang diterima benda uji dan luas bidang tekan.

Indeks kuat tekan relatif juga dihitung untuk mengevaluasi perubahan kinerja mekanik campuran modifikasi terhadap campuran kontrol. Indeks kuat tekan relatif dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$I_{cs} = \frac{f_{c,i}}{f_{c,0}} \times 100\% \quad (1)$$

dimana I_{cs} adalah indeks kuat tekan relatif (%), $f_{c,i}$ adalah kuat tekan mortar pada campuran V10-V30 (MPa), dan $f_{c,0}$ adalah kuat tekan kontrol V0 (MPa).

2.3.3. Ultrasonic pulse velocity (UPV)

Pengujian UPV dilakukan pada umur 28 hari menggunakan alat Pundit dengan transduser berfrekuensi 54 kHz. Pengukuran dilakukan pada tiga benda uji untuk setiap variasi campuran dan hasil dilaporkan sebagai nilai rata-rata. ASTM C597[24] digunakan sebagai acuan prinsip pengukuran UPV. Dalam penelitian ini, nilai UPV terutama digunakan sebagai indikator komparatif untuk mengevaluasi perubahan kontinuitas dan kepadatan internal mortar antarvariasi

campuran. Klasifikasi mutu mortar berdasarkan Tabel 3.

Tabel 3. Klasifikasi mutu mortar berdasarkan nilai UPV

Nilai UPV (km/s)	Mutu beton
> 4.50	Sangat baik
3.50–4.50	Baik
3.00–3.50	Meragukan
2.00–3.00	Buruk
< 2.00	Sangat buruk

2.3.4. Initial sorptivity

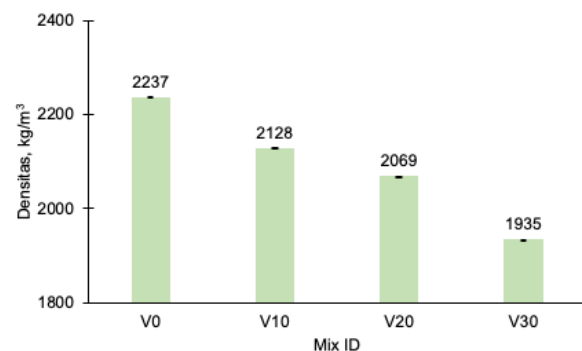
Initial sorptivity dilakukan pada umur 28 hari untuk mengevaluasi laju penyerapan air awal mortar melalui mekanisme hisapan kapiler sesuai ASTM C1585/C1585M[25]. Permukaan sisi samping benda uji dilapisi bahan kedap air sehingga aliran air hanya terjadi dari satu permukaan bawah benda uji. Massa benda uji dicatat pada waktu 0, 60, 300, 600, 1200, 1800, 3600, 7200, 10800, 14400, dan 21600 detik. Penyerapan air kumulatif, I , dihitung berdasarkan perubahan massa benda uji terhadap luas permukaan yang terpapar air dan densitas air. Initial sorptivity (S_i) kemudian ditentukan sebagai kemiringan (slope) regresi linear hubungan antara penyerapan air kumulatif, I , dan akar waktu, $t^{0.5}$, pada periode initial absorption. Nilai S_i digunakan untuk membandingkan laju transport air kapiler awal pada masing-masing campuran.

3. Hasil Penelitian

3.1. Densitas

Hasil pengujian densitas mortar pada umur 28 hari disajikan pada Gambar 2. Campuran kontrol V0 menghasilkan densitas tertinggi sebesar 2237,33 kg/m³. Setelah sebagian PCC digantikan oleh FNS powder dan vermiculite, densitas menurun menjadi 2128,00 kg/m³ pada V10, 2069,33 kg/m³ pada V20, dan 1934,67 kg/m³ pada V30. Dibandingkan dengan V0, penurunan densitas masing-masing campuran adalah 4,89%, 7,51%, dan 13,53%. Tren ini menunjukkan bahwa peningkatan kadar vermiculite memberikan pengaruh langsung terhadap penurunan massa volume mortar. Penurunan densitas tersebut terutama disebabkan oleh perbedaan berat jenis material penyusun. Sehingga, pengurangan PCC dan

peningkatan kadar vermiculite menyebabkan massa padatan per satuan volume mortar menjadi lebih rendah. Pengaruh ini paling jelas terlihat pada V30, yaitu campuran dengan reduksi PCC sebesar 40%. Karakter vermiculite sebagai material ringan dan berpori juga berkontribusi terhadap penurunan densitas mortar. Meskipun vermiculite digunakan dalam kondisi SSD, struktur pori internalnya tetap memengaruhi kepadatan mortar setelah pengerasan. Hasil ini sejalan dengan penelitian Mo et al. yang melaporkan bahwa penggunaan *expanded vermiculite lightweight aggregate* dalam mortar semen menurunkan unit weight karena sifat vermiculite yang ringan dan berpori. Xu et al. juga menunjukkan bahwa mortar dengan *natural lightweight expanded vermiculite aggregate* memiliki densitas lebih rendah dibandingkan mortar normal, dengan konsekuensi terhadap sifat fisik dan mekanik mortar [26]. Temuan serupa dilaporkan oleh Benli et al. dan Koksall et al., di mana penggunaan raw atau *expanded vermiculite* pada mortar menyebabkan penurunan densitas dan perubahan perilaku mekanik, terutama pada kadar penggantian yang lebih tinggi[11][27].



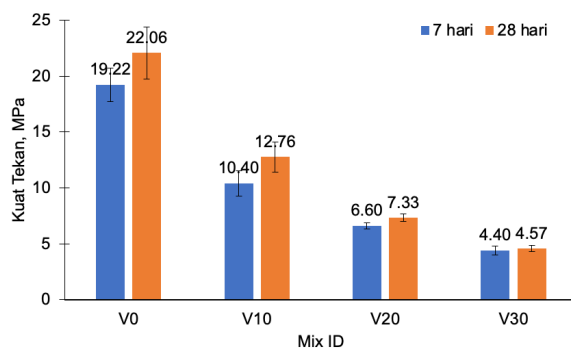
Gambar 1. Densitas mortar pada umur 28 hari

Secara keseluruhan, hasil densitas mortar menunjukkan bahwa kombinasi FNS powder tetap dan peningkatan kadar *raw vermiculite* efektif menurunkan densitas mortar. Çelik juga menegaskan bahwa penggunaan raw vermiculite dalam sistem mortar perlu dikendalikan karena pengaruhnya terhadap sifat fisik, mekanik, dan porositas sangat

bergantung pada ukuran, kadar, dan bentuk penggunaannya dalam campuran [12].

3.2. Kuat Tekan

Hasil pengujian kuat tekan mortar pada umur 7 dan 28 hari disajikan pada Gambar 3. Campuran kontrol V0 menghasilkan kuat tekan tertinggi pada kedua umur pengujian, sedangkan campuran V10, V20, dan V30 menunjukkan penurunan kuat tekan secara bertahap. Pada umur 7 hari, kuat tekan V0 mencapai 19,22 MPa. Nilai tersebut menurun menjadi 10,40 MPa pada V10, 6,60 MPa pada V20, dan 4,40 MPa pada V30. Dibandingkan dengan V0, penurunan kuat tekan 7 hari masing-masing adalah 45,89%, 65,66%, dan 77,11%. Pola yang sama terjadi pada umur 28 hari. Kuat tekan V0 meningkat menjadi 22,06 MPa, sedangkan V10, V20, dan V30 masing-masing hanya mencapai 12,76 MPa, 7,33 MPa, dan 4,57 MPa. Dengan demikian, penurunan kuat tekan 28 hari terhadap V0 adalah 42,16% pada V10, 66,77% pada V20, dan 79,28% pada V30.



Gambar 3. Kuat tekan mortar pada umur 7 dan 28 hari

Indeks kuat tekan relatif (I_{cs}) dihitung untuk menunjukkan kemampuan retensi kuat tekan campuran modifikasi terhadap campuran kontrol (Tabel 4). Pada umur 7 hari, nilai I_{cs} V10, V20, dan V30 masing-masing sebesar 54,11%, 34,34%, dan 22,89%. Pada umur 28 hari, nilai tersebut menjadi 57,84%, 33,23%, dan 20,72%. Hasil ini memperlihatkan bahwa V10 masih memiliki kemampuan retensi kuat tekan yang lebih baik dibandingkan V20 dan V30, sedangkan peningkatan kadar raw

vermiculite lebih lanjut menyebabkan penurunan kapasitas tekan yang semakin besar. Penurunan kuat tekan terutama berkaitan dengan berkurangnya kadar PCC dan meningkatnya kandungan raw vermiculite dalam campuran. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa FNS dapat digunakan sebagai material semen alternatif, tetapi kinerjanya sangat dipengaruhi oleh kadar penggantian, komposisi kimia, dan tingkat reaktivitasnya. Pada kadar penggantian yang tinggi, efek dilusi dapat menyebabkan penurunan kuat tekan apabila pembentukan produk hidrasi tidak cukup untuk mengisi dan memperkuat matriks [4][28].

Peningkatan kadar raw vermiculite juga berperan besar terhadap penurunan kuat tekan. Raw vermiculite memiliki berat jenis rendah dan absorpsi air tinggi, sehingga peningkatan kadarnya dapat menurunkan densitas dan meningkatkan bagian pori dalam mortar. Hasil ini sejalan dengan penelitian pada mortar berbasis vermiculite yang menunjukkan bahwa penambahan vermiculite cenderung menurunkan *unit weight* dan kuat tekan karena karakter partikelnya yang ringan dan berpori [11][10].

Tabel 4. Nilai indeks kuat tekan relatif

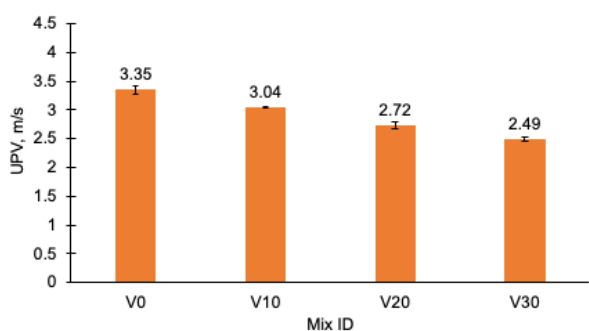
Mix ID	Ics 7 hari (%)	Ics 28 hari (%)
V0	100,00	100,00
V10	54,11	57,84
V20	34,34	33,23
V30	22,89	20,72

Perkembangan kuat tekan dari umur 7 ke 28 hari menunjukkan bahwa V10 mengalami peningkatan tertinggi, yaitu 22,69%, dari 10,40 MPa menjadi 12,76 MPa. V20 hanya meningkat sebesar 11,06%, sedangkan V30 meningkat sebesar 3,86%. Rendahnya peningkatan kuat tekan pada V30 menunjukkan bahwa hidrasi lanjutan tidak cukup efektif untuk memperbaiki kelemahan matriks yang disebabkan oleh tingginya kadar material ringan berpori dan rendahnya kadar PCC. Pada mortar atau beton ringan, agregat ringan berpori dapat menurunkan kapasitas tekan apabila

proporsinya meningkat dan ikatan antarmuka dengan pasta tidak cukup kuat [29]. Secara keseluruhan, hasil kuat tekan menunjukkan bahwa penggunaan FNS powder tetap dengan peningkatan kadar raw vermiculite menurunkan kapasitas mekanik mortar. V10 menghasilkan performa terbaik di antara campuran modifikasi dengan kuat tekan 28 hari sebesar 12,76 MPa dan indeks kuat tekan relatif 57,84%. Sebaliknya, V20 dan V30 menunjukkan penurunan kuat tekan yang lebih besar, sehingga lebih tepat diarahkan untuk aplikasi mortar ringan non-struktural.

3.3. Ultrasonic pulse velocity

Hasil pengujian UPV mortar disajikan pada Gambar 4. Nilai UPV menurun seiring dengan pengurangan kadar PCC dan peningkatan kadar vermiculite dalam campuran.



Gambar 4. Nilai UPV mortar pada umur 28 hari

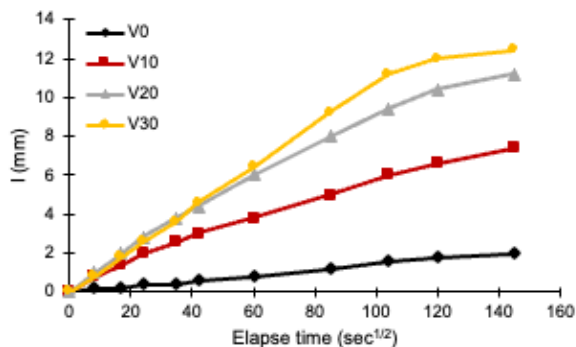
Campuran kontrol V0 menunjukkan nilai UPV tertinggi sebesar 3,35 km/s. Setelah sebagian PCC digantikan oleh FNS powder dan raw vermiculite, nilai UPV menurun menjadi 3,04 km/s pada V10, 2,72 km/s pada V20, dan 2,49 km/s pada V30. Dibandingkan dengan V0, penurunan nilai UPV masing-masing campuran adalah 9,25%, 18,81%, dan 25,67%. Tren ini menunjukkan bahwa peningkatan kadar raw vermiculite menyebabkan penurunan kontinuitas rambat gelombang ultrasonik di dalam mortar. Penurunan UPV tersebut sejalan dengan hasil densitas dan kuat tekan. Campuran dengan densitas lebih tinggi cenderung memiliki jalur rambat gelombang yang lebih kontinu, sedangkan campuran dengan densitas

lebih rendah dan kandungan pori lebih tinggi akan memperlambat rambatan gelombang. Hal ini terlihat pada V30, yang memiliki densitas dan kuat tekan terendah, sekaligus menghasilkan nilai UPV paling rendah. Temuan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa UPV berkaitan erat dengan kepadatan, porositas, dan kualitas internal material berbasis semen [30][31].

Penurunan nilai UPV pada V10–V30 juga dapat dikaitkan dengan karakter raw vermiculite sebagai material ringan berpori yang berpotensi meningkatkan volume pori dan ketidakaturan lokal dalam matriks mortar. Pada kondisi ini gelombang ultrasonik mengalami hambatan akibat adanya pori, zona antarmuka yang lebih lemah, dan distribusi partikel ringan yang tidak sepadat pasta semen normal. Studi pada mortar berbasis agregat berpori juga menunjukkan bahwa perilaku rambat gelombang dipengaruhi oleh ukuran partikel, porositas agregat, dan kondisi zona antarmuka antara agregat dan pasta [32][33]. Berdasarkan klasifikasi UPV yang digunakan dalam penelitian ini, V0 dan V10 berada pada rentang 3,00–3,50 km/s, sedangkan V20 dan V30 berada pada rentang 2,00–3,00 km/s. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kadar raw vermiculite tidak hanya menurunkan kuat tekan, tetapi juga menurunkan kualitas internal mortar berdasarkan indikator non-destruktif. Nilai UPV tidak hanya dipengaruhi oleh kuat tekan, tetapi juga oleh heterogenitas material, distribusi agregat, porositas, dan kondisi antarmuka [34]. Hasil UPV memperkuat hasil densitas dan kuat tekan. Campuran V10 masih menunjukkan nilai UPV yang relatif mendekati campuran kontrol, meskipun telah mengalami reduksi PCC sebesar 20%.

3.4. Initial sorptivity

Hasil pengujian *initial sorptivity* mortar pada umur 28 hari disajikan pada Gambar 5. Campuran kontrol V0 menunjukkan penyerapan air paling rendah, sedangkan campuran V30 menunjukkan penyerapan air paling tinggi selama periode pengujian 6 jam.



Gambar 5 Initial sorptivity pada umur 28 hari

Nilai penyerapan air kumulatif V0 hanya mencapai sekitar 2,0 mm. Nilai tersebut meningkat menjadi sekitar 7,4 mm pada V10, 11,2 mm pada V20, dan 12,4 mm pada V30. Dibandingkan dengan V0, peningkatan penyerapan air kumulatif pada V10, V20, dan V30 masing-masing mencapai sekitar 270%, 460%, dan 520%. Hasil ini menunjukkan bahwa pengurangan kadar PCC dan peningkatan kadar raw vermiculite menyebabkan peningkatan kemampuan mortar dalam menyerap air melalui mekanisme kapiler. Peningkatan initial sorptivity tersebut sejalan dengan hasil densitas, kuat tekan, dan UPV. Campuran dengan densitas dan UPV lebih rendah menunjukkan kecenderungan penyerapan air yang lebih tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan kadar vermiculite menghasilkan struktur internal yang lebih terbuka dan jalur pori yang lebih mudah dilalui air. Dalam material berbasis semen, sorptivity merupakan indikator transport air yang erat berkaitan dengan porositas, konektivitas pori, dan kondisi awal kelembapan material [35][36].

Perbedaan paling besar terlihat antara V0 dan campuran yang mengandung raw vermiculite. Raw vermiculite memiliki struktur ringan berpori dan nilai absorpsi air tinggi, sehingga keberadaannya dapat meningkatkan daya serap air mortar. Pada V10, peningkatan penyerapan masih relatif moderat dibandingkan V20 dan V30. Sebaliknya, V20 dan V30 menunjukkan kenaikan penyerapan yang lebih curam, terutama setelah akar waktu sekitar 40

s^{0.5}. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan kadar raw vermiculite tidak hanya menurunkan kepadatan mortar, tetapi juga meningkatkan konektivitas pori kapiler. Penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa interpretasi sorptivity perlu memperhatikan hubungan antara penyerapan air dan akar waktu, karena respons material berbasis semen dapat dipengaruhi oleh struktur pori, kelembapan awal, serta sensitivitas matriks terhadap air [37][38]. Hasil initial sorptivity menunjukkan bahwa campuran V10 masih memberikan kenaikan penyerapan air yang lebih terkendali dibandingkan V20 dan V30. Dengan demikian, peningkatan kadar vermiculite pada mortar perlu dikontrol karena dapat meningkatkan penyerapan air kapiler secara signifikan, terutama pada campuran dengan reduksi PCC tinggi.

4. Kesimpulan

Berdasarkan kriteria evaluasi densitas rendah, kuat tekan minimum mortar non-struktural, kualitas internal berbasis UPV, dan penyerapan air kapiler, campuran V10 menunjukkan performa paling proporsional dibandingkan variasi lainnya. Campuran ini menghasilkan densitas 2128,00 kg/m³ atau lebih rendah dari batas evaluasi 2200 kg/m³, kuat tekan 28 hari sebesar 12,76 MPa atau masih melampaui batas minimum mortar tipe N sebesar 5,20 MPa, nilai UPV 3,04 km/s yang masih berada pada rentang mutu “meragukan” berdasarkan ASTM C597, serta penyerapan air kumulatif sekitar 7,40 mm atau masih di bawah batas evaluasi 10 mm. Sebaliknya, V20 dan V30 menunjukkan penurunan kinerja yang lebih besar, terutama karena nilai UPV berada di bawah 3,00 km/s dan penyerapan air meningkat melebihi 10 mm, sedangkan V30 juga tidak memenuhi batas kuat tekan minimum. Secara keseluruhan, penurunan densitas akibat peningkatan kadar raw vermiculite berkorelasi dengan penurunan kuat tekan dan UPV, serta peningkatan initial sorptivity. Oleh karena itu, kadar raw vermiculite perlu dibatasi, dan V10 dapat direkomendasikan sebagai komposisi paling

layak untuk mortar ringan non-struktural berbasis pasir pantai dan FNS powder.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada PT Semen Indonesia (Persero) Tbk atas dukungan penyediaan material semen.

6. Daftar Pustaka

- [1] F. Althoey, W. S. Ansari, M. Sufian, and A. F. Deifalla, "Advancements in low-carbon concrete as a construction material for the sustainable built environment," *Dev. Built Environ.*, vol. 16, p. 100284, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.dibe.2023.100284.
- [2] F. Han, H. Zhang, Y. Li, and Z. Zhang, "Recycling and comprehensive utilization of ferronickel slag in concrete," *J. Clean. Prod.*, vol. 414, p. 137633, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137633.
- [3] H. Kim, C. H. Lee, and K. Y. Ann, "Feasibility of ferronickel slag powder for cementitious binder in concrete mix," *Constr. Build. Mater.*, vol. 207, pp. 693–705, May 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.166.
- [4] A. Qi, X. Liu, Z. Wang, and Z. Chen, "Mechanical properties of the concrete containing ferronickel slag and blast furnace slag powder," *Constr. Build. Mater.*, vol. 231, p. 117120, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117120.
- [5] L. Pang, B. Xi, X. Wei, and D. Wang, "Utilizing electric furnace ferronickel slag as a supplementary cementitious material: Hydration and Cr leaching risk," *Constr. Build. Mater.*, vol. 483, p. 141819, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141819.
- [6] A. Dasar and D. Patah, "Kekuatan dan Durabilitas Beton Menggunakan Palm Oil Fuel Ash (POFA) dan Pasir Pantai," *Borneo Eng. J. Tek. Sipil*, vol. 8, no. 1, pp. 83–94, Apr. 2024, doi: 10.35334/be.v8i1.5090.
- [7] D. Patah, A. Dasar, I. Ridhayani, H. Suryani, A. I. Saudi, and S. Sainuddin, "Kekuatan dan Durabilitas Oil Palm Shell (OPS) sebagai Alternatif Pengganti Agregat Kasar pada Beton Bertulang," *JTT J. Teknol. Terpadu*, vol. 12, no. 1, pp. 80–87, Apr. 2024, doi: 10.32487/jtt.v12i1.2103.
- [8] D. Patah and A. Dasar, "Produksi Paving Block Ramah Lingkungan Menggunakan Candlenut Shells (CNS) Sebagai Pengganti Sebagian Abu Batu," *Borneo Eng. J. Tek. Sipil*, vol. 8, no. 1, pp. 95–104, Apr. 2024, doi: 10.35334/be.v8i1.5131.
- [9] D. Patah, A. Dasar, and N. Md. Noor, "The Effects of Palm Oil Fuel Ash on Mechanical and Durability Properties of Sustainable Foamed Concrete," *J. Civ. Eng. Forum*, pp. 75–84, Jan. 2025, doi: 10.22146/jcef.13749.
- [10] K. H. Mo, H. J. Lee, M. Y. J. Liu, and T.-C. Ling, "Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 179, pp. 302–306, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.219.
- [11] A. Benli, M. Karatas, and H. Anil Toprak, "Mechanical characteristics of self-compacting mortars with raw and expanded vermiculite as partial cement replacement at elevated temperatures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 239, p. 117895, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117895.
- [12] Z. Çelik, "Investigation of the use of ground raw vermiculite as a supplementary cement materials in self-compacting mortars: Comparison with class C fly ash," *J. Build. Eng.*, vol. 65, p. 105745, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.jobbe.2022.105745.
- [13] Y. Xu, F. Ye, B. Xiong, and C. Demartino, "Mortar with natural light-weight expanded vermiculite aggregate: Physical and mechanical properties," *Constr. Build. Mater.*, vol. 440, p. 137226, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137226.
- [14] Z. Li *et al.*, "Investigating the effects of seawater and sea sand aggregates and supplementary cementitious materials on the early shrinkage and crack resistance of concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 392, p. 131719, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131719.
- [15] A. Dasar, D. Patah, and N. Okviyani, "Impact of incorporating nano-palm oil fuel ash on the mechanical properties and durability of paving blocks prepared with seawater and sea sand for sustainable construction," *Constr. Build. Mater.*, vol. 481, p. 141539, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141539.
- [16] D. Patah, A. Dasar, and A. Nurdin, "Sustainable concrete using seawater, sea-sand, and ultrafine palm oil fuel ash: Mechanical properties and durability," *Case*

- Stud. Constr. Mater.*, vol. 22, p. e04129, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e04129.
- [17] D. Patah, A. Dasar, F. Fakhruddin, B. Shintarahayu, and A. Apriansyah, "The Impact of Fly Ash and Sea Sand on Strength and Durability of Concrete," *Key Eng. Mater.*, vol. 1000, pp. 23–33, Dec. 2024, doi: 10.4028/p-o0WA24.
- [18] C01 Committee, *Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement*. doi: 10.1520/C0114-18.
- [19] L. Chi, S. Lu, Z. Li, C. Huang, H. Jiang, and B. Peng, "Recycling of ferronickel slag tailing in cementitious materials: Activation and performance," *Sci. Total Environ.*, vol. 861, p. 160706, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160706.
- [20] C09 Committee, *Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. doi: 10.1520/C0128-22.
- [21] C09 Committee, *Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. doi: 10.1520/C0136-06.
- [22] C01 Committee, *Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 50mm [2 in.] Cube Specimens)*. doi: 10.1520/C0109_C0109M-26.
- [23] C09 Committee, *Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. doi: 10.1520/C0642-21.
- [24] C09 Committee, *Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. doi: 10.1520/C0597-09.
- [25] C09 Committee, *Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*. doi: 10.1520/C1585-20.
- [26] J. Liu *et al.*, "Physical and mechanical properties of expanded vermiculite (EV) embedded foam concrete subjected to elevated temperatures," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 16, p. e01038, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01038.
- [27] F. Koksall, T. Nazlı, A. Benli, O. Gencel, and G. Kaplan, "The effects of cement type and expanded vermiculite powder on the thermo-mechanical characteristics and durability of lightweight mortars at high temperature and RSM modelling," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 15, p. e00709, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00709.
- [28] M. Nuruzzaman, J. C. Kuri, and P. K. Sarker, "Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete with the dual use of ferronickel slag as fine aggregate and supplementary binder," *Constr. Build. Mater.*, vol. 318, p. 125927, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125927.
- [29] J. Fořt, A. Afolayan, I. Medved', L. Scheinherrová, and R. Černý, "A review of the role of lightweight aggregates in the development of mechanical strength of concrete," *J. Build. Eng.*, vol. 89, p. 109312, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.jobte.2024.109312.
- [30] R. Mata, R. O. Ruiz, and E. Nuñez, "Correlation between compressive strength of concrete and ultrasonic pulse velocity: A case of study and a new correlation method," *Constr. Build. Mater.*, vol. 369, p. 130569, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130569.
- [31] N. Sathiparan, P. Jeyanathan, and D. N. Subramaniam, "Surface response regression and machine learning techniques to predict the characteristics of pervious concrete using non-destructive measurement: Ultrasonic pulse velocity and electrical resistivity," *Measurement*, vol. 225, p. 114006, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.measurement.2023.114006.
- [32] X. Zhang, J. Zuo, Z. Wang, Y. Cai, and Y. Zhou, "The evolution of the microstructure and mechanical properties of coral aggregate mortar under uniaxial compression using ultrasonic analysis," *Constr. Build. Mater.*, vol. 300, p. 124000, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124000.
- [33] Y. Zhang and F. Aslani, "Compressive strength prediction models of lightweight aggregate concretes using ultrasonic pulse velocity," *Constr. Build. Mater.*, vol. 292, p. 123419, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123419.
- [34] Z. Yu, Z. Chen, P. Chen, X. Liu, Y. Wu, and C. Wang, "Factors affecting uniaxial compressive strength and ultrasonic pulse velocity of meso-scale heterogeneous concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 389, p. 131680, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131680.
- [35] F. Ren, C. Zhou, L. Li, H. Cui, and X. Chen, "Modeling the dependence of capillary sorptivity on initial water content for cement-based materials in view of water sensitivity," *Cem. Concr. Res.*, vol. 168, p. 107158, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.cemconres.2023.107158.
- [36] F. Ren, C. Zhou, Q. Zeng, Z. Wang, and W. Wang, "Numerical investigations into the

- physical significance of sorptivity for cement-based materials considering water sensitivity,” *J. Build. Eng.*, vol. 66, p. 105952, May 2023, doi: 10.1016/j.jobe.2023.105952.
- [37] Y. A. Villagrán-Zaccardi *et al.*, “Relationship between sorptivity coefficients of concrete as calculated from the evolution of water uptake versus $t_{0.5}$ or $t_{0.25}$,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 342, p. 128084, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128084.
- [38] K. Hanumanthu and K. Sarkar, “Improved sorptivity models for mortar and concrete based on significant process parameters,” *J. Build. Eng.*, vol. 47, p. 103912, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.jobe.2021.103912.