

Karakteristik Perambatan Gelombang Ultrasonik pada Beton Bertulang Berdasarkan Variasi Umur dan Kontras Impedansi Akustik

Characteristics of Ultrasonic Wave Propagation in Reinforced Concrete Based on Variations in Age and Acoustic Impedance Contrast

Evin Yudhi Setyono^{1*}, Fajar Surya Herlambang²

^{1*}Politeknik Negeri Bali, Kampus Bukit Jimbaran, Badung, Bali

²Politeknik Negeri Semarang, Jl. Prof. Soedarto, Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah

Email: yudhisetyono@pnb.ac.id; fajar.herlambang@polines.ac.id

Received: 3th June 2026; Revised: 1st July 2026; Accepted: 3th August 2026

Abstrak – Penelitian ini mengkaji karakteristik perambatan gelombang ultrasonik pada beton bertulang pada berbagai usia dan perbedaan impedansi akustik. Pengujian ultrasonik dilakukan menggunakan alat UPV James *Instrument Mark IV* pada beton tanpa tulangan, beton dengan tulangan polos, dan beton dengan tulangan ulir pada usia 7, 14, 28, 42, dan 56 hari. Analisis difokuskan pada empat parameter perambatan gelombang, yaitu kecepatan gelombang, modulus elastisitas dinamis, impedansi akustik, dan koefisien transmisi amplitudo. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketiga jenis spesimen memperlihatkan pola perambatan yang serupa. Peningkatan kecepatan yang tajam terjadi pada rentang usia 7-28 hari, yang mengindikasikan adanya hidrasi intensif dan pepadatan struktur mikro, diikuti oleh peningkatan yang lebih landai pada rentang usia 28-42 hari. Spesimen beton bertulang secara konsisten memiliki kecepatan ultrasonik dan nilai impedansi akustik yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton tanpa tulangan. Hal ini menunjukkan bahwa jalur perambatan gelombang dipengaruhi oleh tulangan baja, yang memiliki kecepatan gelombang dan impedansi akustik lebih tinggi daripada beton. Penurunan kecil pada kecepatan dan impedansi akustik pada rentang usia 42-56 hari mengindikasikan kemungkinan adanya perubahan struktur mikro, seperti berkurangnya kadar air, inisiasi retak mikro, dan peningkatan hamburan internal. Koefisien transmisi amplitudo ditemukan sedikit lebih besar dari satu ($T > 1$). Kondisi ini dapat terjadi pada antarmuka antara dua medium dengan impedansi berbeda akibat mekanisme transmisi dan normalisasi amplitudo gelombang. Tulangan baja memiliki impedansi akustik yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan beton, sehingga ketika gelombang mencapai antarmuka beton-baja, amplitudo gelombang yang ditransmisikan dapat menjadi sedikit lebih besar daripada amplitudo gelombang datang.

Kata kunci: Gelombang ultrasonik; beton bertulang; umur beton; impedansi akustik; perambatan gelombang.

Abstract – This study investigates the characteristics of ultrasonic wave propagation in reinforced concrete at different ages and acoustic impedance contrast. Ultrasonic testing was conducted using UPV James *Instrument Mark IV* on non-reinforced concrete, plain-reinforced concrete, and deformed-reinforced concrete at ages of 7, 14, 28, 42, and 56 days. The analysis focused on four parameters of wave propagation, which are wave velocity, dynamic elastic modulus, acoustic impedance, and amplitude transmission coefficient. The results show that all three specimens show a similar propagation pattern. A sharp increase in velocity occurs at 7-28 days, indicating intensive hydration and microstructural densification, followed by a more gradual increase at 28-42 days. Reinforced concrete specimens steadily have higher ultrasonic velocities and acoustic impedance values than non-reinforced concrete, indicating the wave propagation path was influenced by steel reinforcement, which has a higher wave velocity and acoustic impedance than concrete. A mild reduction in velocity and acoustic impedance at 42-

56 days indicates possible microstructural changes, such as moisture reduction, microcrack initiation, and increased internal scattering. The amplitude transmission coefficient was found to be slightly greater than one ($T > 1$); this can still occur at the interface between two media with different impedances due to the transmission mechanism and normalization of wave amplitude. Steel reinforcement has a much higher acoustic impedance than concrete, so when a wave reaches the concrete-steel interface, the transmitted wave amplitude can be slightly greater than the incident wave amplitude.

Keywords: Ultrasonic waves; reinforced concrete; aging; acoustic impedance; wave propagation.

1. Pendahuluan

Kecepatan rambat gelombang adalah salah satu parameter penting dalam pengujian NDT (*Non-Destructive Test*) untuk mengevaluasi mutu beton [1, 2]. Kuat tekan beton ataupun umur beton seringkali dikorelasikan dengan nilai cepat rambat gelombang ultrasonik [2, 3]. Kecepatan gelombang juga bergantung pada faktor sifat elastik dan densitas material, sehingga asumsi bahwa beton adalah medium homogen tidak sepenuhnya benar, Matriks semen, agregat, pori, dan elemen baja tulangan menjadikan beton bertulang suatu sistem yang heterogen [3, 4]. Karakteristik dari perambatan gelombang menjadi terpengaruh dan akan menyebabkan variasi sifat mekanik dan akustik di dalam medium. Fenomena transmisi parsial, refleksi, dan *scattering* akibat perbedaan impedansi akustik antar material terjadi saat gelombang ultrasonik berinteraksi dengan antarmuka beton dan baja [1, 2].

Dalam perspektif fisika gelombang, hal tersebut menunjukkan bahwa selain sifat intrinsik material yang direpresentasikan, namun juga respon efektif dari gelombang terhadap medium yang kompleks [2, 5]. Oleh karena itu, mekanisme yang terjadi dalam beton bertulang menjadi kurang memadai untuk diinterpretasi oleh analisis yang hanya mengandalkan hubungan empiris nilai UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*) [4, 5]. Analisis tersebut idealnya dikembangkan dalam kerangka berbasis fisika yang juga mempertimbangkan interaksi gelombang dalam medium yang heterogen. Modulus elastik dinamis dan impedansi akustik dapat menjadi parameter yang dapat digunakan untuk menggambarkan karakteristik medium secara lebih komprehensif [6, 7]. Karakteristik beton yang bergantung terhadap waktu akibat proses hidrasi juga menambah kompleksitas sistem, karena medium perambatan mengalami evolusi mikrostruktur yang mempengaruhi jalur rambat gelombang [8].

Hubungan empiris antara kecepatan gelombang dan parameter material masih mendominasi studi yang telah dilakukan. Penelitian-penelitian tersebut juga masih mengandalkan asumsi beton sebagai medium yang relatif homogen [1, 9–11]. Efek perbedaan impedansi dan interaksi gelombang pada antarmuka beton–baja kurang dianalisis secara mendalam, peran tulangan dalam beton umumnya hanya diperlakukan sebagai faktor tambahan. Akibatnya, pemahaman terhadap propagasi gelombang dalam beton bertulang masih terbatas dan cenderung disederhanakan, terutama dalam konteks interpretasi UPV yang masih dominan berbasis korelasi empiris [4, 12].

Berdasarkan uraian tersebut penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh umur beton dan impedansi akustik terhadap perambatan gelombang ultrasonik pada beton bertulang. Analisis dilakukan melalui interpretasi kecepatan gelombang dengan pendekatan berbasis fisika, untuk memahami hubungan antara perkembangan kekakuan beton, heterogenitas material akibat tulangan, dan karakteristik perambatan gelombang ultrasonik. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberi pemahaman yang lebih mendalam mengenai perilaku gelombang ultrasonik pada beton bertulang sebagai medium heterogen serta meningkatkan kehandalan interpretasi metode UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*) dalam evaluasi struktur beton.

2. Landasan Teori

Gelombang Longitudinal (*P-wave*) dalam uji ultrasonik merupakan jenis gelombang mekanik di mana partikel dalam material bergetar searah dengan arah rambat gelombang. Dalam pengujian NDT (*Non-Destructive Test*), gelombang ini menciptakan area rapatan dan regangan saat merambat melalui medium. Gelombang tersebut umum digunakan untuk mengevaluasi kekuatan

material, karena faktor besar kecepatannya dan kemudahan pengukuran [13]. Teori elastodinamika klasik untuk medium padat isotropik mendefinisikan kecepatan gelombang longitudinal dengan menggunakan sifat elastisitas material, yaitu modulus bulk dan modulus geser, serta densitas material. Dasar analisis perambatan gelombang dalam material padat, secara fundamental menggunakan hubungan ini dalam model gelombang elastik untuk medium kontinu isotropik.

Beton merupakan material komposit heterogen yang mengandung pori, agregat dan retak mikro. Namun begitu, meskipun tidak memenuhi asumsi medium homogen ideal, interpretasi uji UPV menggunakan formulasi ini secara luas sebagai dasar teoritis [3, 11, 14]. Dalam konteks penelitian ini, hubungan dalam persamaan tersebut menjadi dasar konseptual untuk memahami bagaimana proses perambatan gelombang. Lebih lanjut, analisis akan difokuskan pada kecepatan gelombang efektif yang tercatat dari hasil pengukuran UPV.

Pengukuran dari pengujian ultrasonik tidak dipandang semata sebagai representasi sifat elastik material, melainkan merupakan respon dinamis dari sistem komposit heterogen [11, 14]. Beragam parameter mikrostruktur seperti porositas, distribusi agregat, serta diskontinuitas akibat heterogenitas internal dan keberadaan tulangan seringkali mempengaruhi nilai pembacaan ultrasonik. Dengan kata lain, sifat intrinsik dari suatu material bukan merupakan faktor utama yang terhubung dengan nilai UPV. Kekakuan material dalam kondisi pembebanan dinamis, menjadi parameter yang dapat dijelaskan oleh nilai modulus elastik dinamis (E_d) yang direpresentasikan melalui kecepatan rambat gelombang ultrasonik.

Kecepatan gelombang (V), densitas material (ρ), rasio Poisson (ν) dan modulus elastik dinamis (E_d) terhubung dalam persamaan matematis pada Persamaan (1), yang mana merupakan formulasi teori dasar dalam elastodinamika klasik. Formulasi ini diturunkan dari persamaan gelombang dalam medium kontinu elastik [15]. Berbagai kajian tentang perambatan gelombang elastik dalam medium padat, menjadikan persamaan tersebut sebagai landasan fundamental dan digunakan secara luas dalam berbagai aplikasi fisika material. Parameter modulus elastik dinamis (E_d) menggambarkan kemampuan material dalam mentransmisikan gelombang elastik. Pada beton bertulang, nilai E_d yang dihitung dari UPV harus diinterpretasikan sebagai modulus efektif, karena dipengaruhi oleh jalur rambat gelombang yang tidak homogen [3, 4].

$$E_d = \rho V^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (1)$$

Setiap material memiliki karakteristik yang berbeda-beda dalam menerima perambatan gelombang. Karakteristik itu menunjukkan adanya suatu resistansi intrinsik yang dimiliki medium tersebut. Resistansi intrinsik medium dalam kaitannya dengan uji ultrasonik merupakan besaran fisis yang disebut dengan istilah impedansi akustik (Z). Nilai ini menjadi salah satu parameter penting dalam analisis perambatan gelombang [16, 17]. Besaran impedansi akustik (Z) suatu material secara matematis didefinisikan sebagai hasil perkalian antara densitas material (ρ) dan kecepatan gelombang (V). Hubungan linier ini ditunjukkan oleh Persamaan (2).

$$Z = \rho V \quad (2)$$

Sesuai dengan prinsip dasar perambatan gelombang elastik pada antarmuka dua medium, gelombang yang merambat melalui material dengan perbedaan impedansi akustik akan mengalami refleksi dan transmisi.

Pada beton bertulang, kontras impedansi antara matriks beton dan tulangan baja menyebabkan terjadinya perubahan karakteristik perambatan gelombang, seperti *scattering* dan *mismatch medium* [3, 4]. Ketika gelombang mencapai batas dua medium dengan impedansi berbeda, amplitudo gelombang datang akan terbagi menjadi komponen gelombang terpantul dan gelombang tertransmisikan. Besarnya amplitudo gelombang yang dipantulkan maupun diteruskan dinyatakan melalui koefisien refleksi atau koefisien transmisi amplitudo. Koefisien ini diturunkan dari teori gelombang elastik satu dimensi dengan menerapkan kondisi batas kontinuitas tegangan dan kecepatan partikel pada antarmuka dua medium [18]. Koefisien transmisi amplitudo gelombang dinyatakan oleh Persamaan (3).

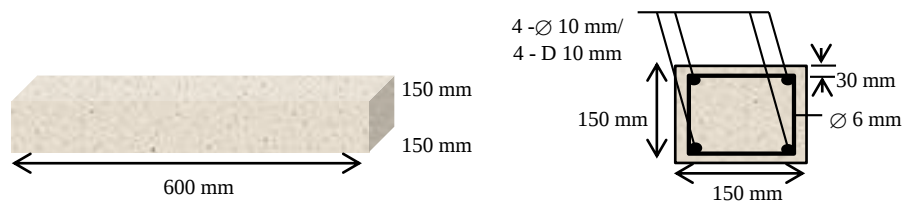
$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (3)$$

Dalam penelitian ini, nilai impedansi pada beton tak bertulang dijadikan sebagai referensi Z_1 , sementara Z_2 merupakan nilai impedansi beton bertulang baik tulangan polos maupun ulir. Perbedaan kedua nilai impedansi Z yang signifikan, merupakan indikasi peningkatan refleksi dan *scattering* gelombang, sehingga mempengaruhi waktu tempuh dan kecepatan efektif. Kontras impedansi akustik tergambar melalui analisis koefisien transmisi amplitudo, sementara kecepatan gelombang dan impedansi akustik berperan sebagai parameter pendukung propagasi gelombang.

3. Material Dan Metode

3.1 Material

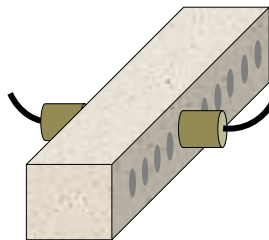
Beton normal dengan satu desain campuran, dibentuk menjadi 3 spesimen berbentuk balok ($150 \times 150 \times 600 \text{ mm}^3$) dengan variasi spesimen beton tanpa tulangan (*non-reinforced concrete*) (NR)), tulangan besi polos (*plain-reinforced concrete* (PR)) dan tulangan besi ulir (*deformed-reinforced concrete* (DR)), seperti tampak pada Gambar 1. Ukuran besi tulangan menggunakan diameter 10 mm, dengan posisi tulangan ditempatkan secara horizontal menggunakan sengkang berdiameter 6 mm dan tebal selimut beton 30 mm.



Gambar 1. Dimensi balok beton spesimen dan penampang detail tulangan beton.

3.2 Metode

Uji ultrasonik menggunakan alat UPV *James Instruments Mark IV* dengan konfigurasi transduser *direct transmission*. Pada konfigurasi ini, transduser pemancar dan penerima ditempatkan saling berhadapan pada dua sisi sehingga lintasan gelombang melewati seluruh penampang beton secara langsung. Metode *direct transmission* dipilih karena memberikan jalur propagasi paling pendek dan paling stabil, sehingga menghasilkan akurasi pengukuran waktu tempuh gelombang yang lebih tinggi dibandingkan dengan *semi-direct* maupun *indirect transmission*. Pengujian menggunakan frekuensi transduser sebesar 54 kHz yang masih berada dalam rentang umum UPV beton (20–100 kHz) [1, 19, 20]. Pengukuran kecepatan gelombang ultrasonik dilakukan pada umur beton 7, 14, 28, 42, dan 56 hari untuk memantau perkembangan sifat material akibat proses hidrasi seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Posisi transduser UPV secara *direct transmission* pada 10 titik pengujian.

Data yang diperoleh dari pengujian UPV berupa kecepatan rambat gelombang (V), yang secara internal menghitung rasio panjang lintasan (L) dan waktu tempuh (t) pada setiap spesimen dan umur pengujian. Pengujian dilakukan sebanyak 10 titik di sepanjang sisi balok beton (Gambar 2), dengan spasi 50 mm antar tiap titik uji. Gel ultrasonik juga diaplikasikan pada kedua transduser untuk memastikan *coupling* transduser yang baik selama pengujian. Kecepatan gelombang ultrasonik yang tercatat kemudian dirata-rata untuk mendapatkan satu nilai kecepatan per spesimen per umur beton untuk analisis.

Selanjutnya, parameter turunan berupa modulus elastisitas dinamis (E_d) dihitung menggunakan persamaan (1), dengan asumsi rasio Poisson sebesar 0,2. Masa jenis masing-masing spesimen diperoleh dari pengukuran massa dan volumenya, densitas beton tak bertulang sebesar 2245 kg/m^3 , beton tulangan polos sebesar 2380 kg/m^3 dan beton tulangan ulir sebesar 2390 kg/m^3 . Impedansi akustik (Z) dihitung dari relasi masa jenis material (ρ) dan kecepatan gelombang ultrasonik (V) menggunakan persamaan (2). Untuk mengevaluasi interaksi gelombang pada sistem heterogen, koefisien transmisi amplitudo (T) dihitung dan dianalisis sebagai indikator kontras impedansi menggunakan Persamaan (3).

3. Hasil Dan Pembahasan

Pengujian ultrasonik pada 10 titik di sepanjang balok spesimen per umur beton menghasilkan suatu nilai rata-rata kecepatan. Standar deviasi pengukuran berkisar antara 22-46 m/s atau sebesar 0,6-1,2% pada kisaran nilai kecepatan sekitar 3500-3700 m/s. Penyimpangan pengukuran yang relatif kecil tersebut menunjukkan pengulangan yang baik dari pengukuran UPV (ultrasonic pulse velocity) dan menunjukkan kestabilan pengukuran.

Data nilai kecepatan gelombang ultrasonik (V), modulus elastisitas dinamis (E_d) dan nilai impedansi akustik (Z) untuk variasi umur beton 7, 14, 28, 42, dan 56 hari pada sampel beton tanpa tulangan, beton tulangan ulir dan tulangan polos disajikan dalam Tabel 1. Penelitian ini memiliki keterbatasan pengukuran nilai Poisson secara eksperimen, sehingga menggunakan asumsi nilai Poisson sebesar 0,2. Nilai tersebut digunakan dalam analisis perhitungan modulus elastisitas dinamis (E_d) dan impedansi akustik (Z). Nilai Poisson beton konvensional umumnya berkisar antara 0,15-0,25 [21], sehingga asumsi $\nu = 0,2$ dalam analisis penelitian ini masih berada dalam rentang teoritis yang lazim digunakan dalam analisis rekayasa material.

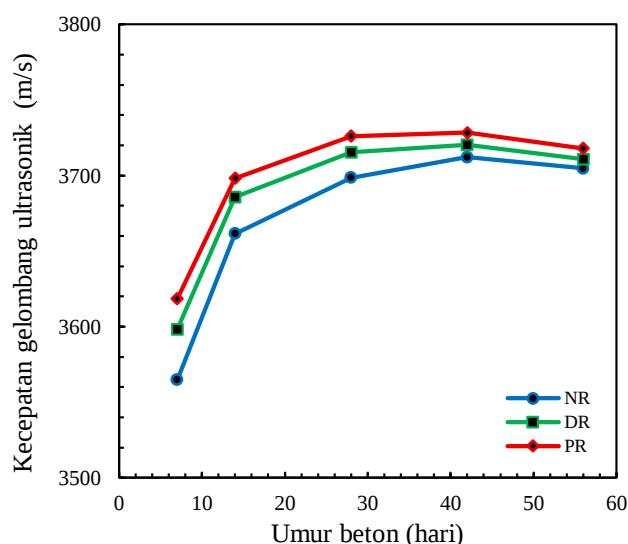
Tabel 1. Kecepatan gelombang ultrasonik (v), modulus elastisitas dinamis (E_d) dan impedansi akustik (Z) semua spesimen beton pada berbagai umur.

Umur Beton (hari)	Spesimen	V (m/s)	E_d (GPa)	Z ($\times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$)
7	NR	3564,8	28,53	8,00
	DR	3598,1	29,06	8,60
	PR	3618,5	29,40	8,65
14	NR	3661,6	30,10	8,22
	DR	3685,7	30,50	8,81
	PR	3698,2	30,70	8,84
28	NR	3698,6	30,71	8,30
	DR	3715,5	30,99	8,88
	PR	3726,1	31,17	8,91
42	NR	3712,1	30,94	8,33
	DR	3720,2	30,91	8,89
	PR	3728,4	31,03	8,91
56	NR	3704,7	30,81	8,32
	DR	3710,7	30,91	8,87
	PR	3717,9	31,03	8,89

Keterangan: NR = *Non-Reinforced*, DR = *Deformed-Reinforced*, dan PR = *Plain-Reinforced*.

Berdasarkan Tabel 1, selanjutnya dibuat grafik kecepatan gelombang ultrasonik pada varian umur beton yang disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 3. Grafik tersebut akan dapat menjelaskan kaitan umur beton selama proses hidrasi terhadap besar kecepatan gelombang ultrasonik yang merambat pada beton.

Ketiga spesimen beton yakni beton tak bertulang (*Non-Reinforced* (NR)), beton tulangan polos (*Plain-Reinforced* (PR)) dan tulangan ulir (*Deformed-Reinforced* (DR)) teramati memiliki pola grafik (kurva) yang relatif sama. Kesamaan pola pada Gambar 3 tersebut mengindikasikan bahwa perkembangan mikrostruktur dalam beton selama proses hidrasi menjadi faktor dominan yang mengontrol perubahan kecepatan gelombang ultrasonik. Posisi grafik spesimen beton tanpa tulangan (NR) menunjukkan nilai kecepatan paling kecil, kemudian tulangan polos (PR), dan tulangan ulir (DR) menghasilkan nilai tertinggi. Hasil ini konsisten dengan penelitian yang dilakukan oleh Parihar et al. (2022) yang menyatakan bahwa keberadaan tulangan dalam beton dapat meningkatkan nilai UPV, karena sebagian lintasan gelombang merambat melalui tulangan yang memiliki kecepatan rambat dan impedansi akustik lebih tinggi dibanding beton [22]. Penelitian lain oleh Nanayakkara et al. (2022) juga menunjukkan bahwa peningkatan persentase tulangan menyebabkan nilai UPV terukur semakin besar dibanding beton tanpa tulangan [23].



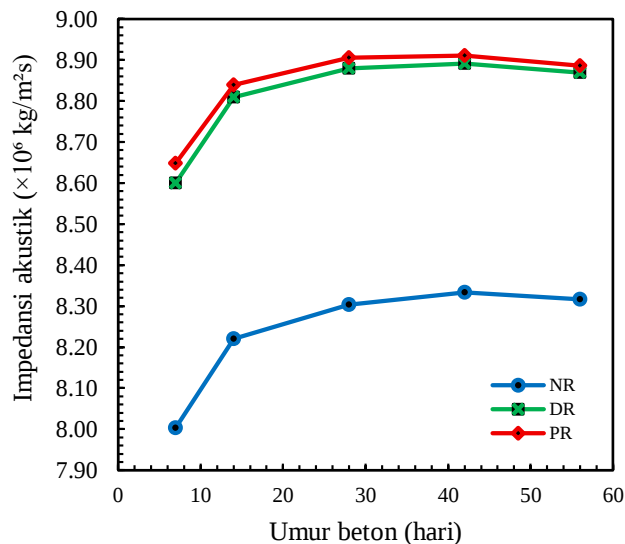
Gambar 3. Kecepatan gelombang ultrasonik semua spesimen pada rentang umur beton 7-56 hari.

Dari Gambar 3 tampak pada ketiga grafik terjadi peningkatan yang tajam pada kecepatan gelombang ultrasonik pada rentang umur 7-28 hari. Hasil yang serupa ditunjukkan dalam penelitian Kim et al. (2022) yang menyatakan bahwa peningkatan umur beton awal menyebabkan densifikasi mikrostruktur akibat proses hidrasi, menyebabkan kontinuitas medium rambat gelombang menjadi lebih baik sehingga kecepatan gelombang meningkat [24]. Pada rentang umur 28-42 hari, kenaikan kecepatan gelombang melambat hingga selanjutnya cenderung turun menuju umur 56 hari. Fenomena ini mengindikasikan bahwa proses hidrasi mulai mendekati kondisi stabil, sehingga peningkatan densifikasi mikrostruktur beton tidak lagi sebesar pada fase awal. Meskipun demikian, proses penguatan internal beton masih berlangsung, sehingga nilai kecepatan gelombang tetap mengalami kenaikan secara gradual dan dapat dikaitkan dengan mulai berkurangnya kelembapan internal beton akibat proses pengeringan bertahap [25, 26].

Nilai modulus elastisitas dinamis (E_d) seperti terlihat pada Tabel 1, akan memiliki pola yang hampir identik dengan kecepatan gelombang (V). Hal ini secara fisis terhubung melalui relasi elastodinamika $E_d \propto \rho V^2$, sehingga setiap kenaikan kecepatan gelombang (V) akan secara kuadratik meningkatkan modulus elastisitas (E_d). Hal ini menjelaskan mengapa pada umur 7-42 hari terjadi peningkatan di awal dan kemudian melandai saat umur 42-56 hari dimana sistem mendekati kondisi jenuh. Keadaan ini telah banyak dijelaskan sebagai karakteristik umum beton normal, di mana perkembangan modulus elastisitas dinamis (E_d) mengikuti evolusi kecepatan ultrasonik sebagai indikator kekakuan efektif material [1, 3].

Keterkaitan antara nilai impedansi akustik (Z) dengan grafik kecepatan vs umur menjadi lebih jelas pada fase umur 42-56 hari seperti terlihat pada Gambar 4. Pada fase tersebut di semua spesimen terjadi sedikit penurunan pada kecepatan gelombang (V) dan impedansi akustik (Z).

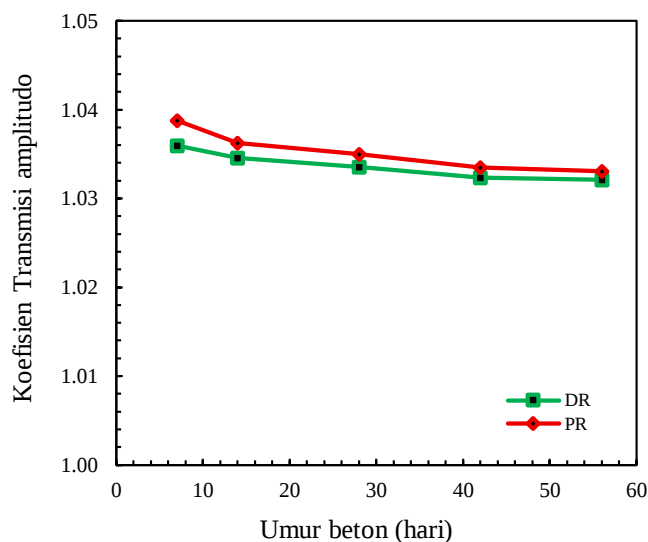
Terdapat indikasi bahwa, perubahan yang terjadi bukan hanya pada aspek elastisitas, akan tetapi juga pada karakteristik densitas medium yang diduga akibat munculnya mikroretak dan peningkatan heterogenitas internal. Mikroretak diyakini dapat menurunkan kontinuitas jalur rambat gelombang, sehingga tidak hanya memperlambat kecepatan tetapi juga menurunkan impedansi akustik secara keseluruhan. Dengan demikian, sedikit penurunan kecepatan gelombang (V) dan impedansi akustik (Z) pada umur lanjut (42-56 hari) dapat mengindikasikan adanya perubahan mikrostruktur internal beton, seperti berkurangnya kelembaban, inisiasi mikroretak, atau peningkatan *scattering* gelombang, yang belum tentu teridentifikasi melalui parameter mekanik konvensional. Karakteristik ini sesuai dengan beberapa penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa parameter ultrasonik memiliki sensitivitas tinggi terhadap evolusi mikrostruktur dan heterogenitas internal beton, bahkan sebelum perubahan signifikan terdeteksi melalui pengujian mekanik konvensional [6–8].



Gambar 4. Impedansi akustik semua spesimen pada rentang umur beton 7-56 hari.

Gambar 5 menunjukkan hubungan antara koefisien transmisi amplitudo dan umur beton pada masing-masing spesimen. Parameter yang digunakan merupakan koefisien transmisi amplitudo, bukan transmisi energi. Grafik koefisien transmisi amplitudo (T) terhadap umur beton pada Gambar 5 menunjukkan bahwa kemampuan rambat gelombang ultrasonik pada beton bertulang sangat dipengaruhi oleh perkembangan mikrostruktur serta karakteristik antarmuka beton dan tulangan. Tulangan baja memiliki nilai impedansi akustik 4-5 kali lebih tinggi dibanding beton, baja memiliki impedansi akustik sebesar $45 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ sementara beton hanya sekitar $11 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ [27]. Sehingga, saat gelombang mencapai antar muka beton dan baja, amplitudo gelombang yang ditransmisikan dapat menjadi sedikit lebih besar dibanding amplitudo gelombang datang. Hal ini menjelaskan mengapa pada penelitian ini nilai koefisien transmisi amplitudo sedikit lebih besar dari 1 ($T > 1$).

Nilai koefisien transmisi amplitudo pada beton bertulang polos (PR) dan beton bertulang ulir (DR) cenderung mengalami penurunan yang ringan seiring bertambahnya umur beton. Nilai koefisien transmisi amplitudo yang relatif lebih tinggi pada umur awal menunjukkan bahwa perambatan gelombang ultrasonik masih dipengaruhi oleh kontras impedansi akustik yang cukup besar antara beton dan baja tulangan. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa perubahan kontras impedansi antara beton dan baja dapat mempengaruhi perilaku perambatan, transmisi, dan attenuasi gelombang ultrasonik pada sistem beton bertulang [28].



Gambar 5. Koefisien transmisi amplitudo semua spesimen pada rentang umur beton 7-56 hari.

Seiring pertambahan umur beton, peningkatan kualitas mikrostruktur beton juga menyebabkan kenaikan pada impedansi akustiknya. Pada fase ini selisih impedansi antara beton dan baja menjadi sedikit berkurang, mengakibatkan koefisien transmisi amplitudo cenderung menurun dan mendekati kondisi stabil. Spesimen dengan tulangan polos (PR) menunjukkan nilai koefisien transmisi amplitudo sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan tulangan ulir (DR). Hal ini mengindikasikan bahwa kontras impedansi efektif pada antarmuka beton dan baja pada tulangan polos masih relatif lebih besar, sehingga amplitudo gelombang yang ditransmisikan menjadi lebih tinggi. Sebaliknya, pada tulangan ulir, ikatan mekanis antara beton dan baja yang lebih baik dapat meningkatkan kontinuitas perambatan gelombang pada zona antarmuka, sehingga nilai koefisien transmisi amplitudo menjadi sedikit lebih rendah namun lebih stabil. Secara umum, grafik ini menunjukkan bahwa perubahan karakteristik perambatan gelombang ultrasonik pada beton bertulang tidak hanya dipengaruhi oleh umur beton, tetapi juga oleh kontras impedansi akustik dan karakteristik antarmuka antara beton dan tulangan baja.

4. Kesimpulan

Berdasarkan analisis dan pembahasan, karakteristik perambatan gelombang ultrasonik pada beton bertulang dipengaruhi oleh variasi umur beton dan kontras impedansi akustik antara beton dan tulangan baja. Kecepatan gelombang ultrasonik (V), modulus elastisitas dinamis (E_d), dan impedansi akustik (Z) menunjukkan peningkatan signifikan pada umur awal (7-28 hari) akibat proses hidrasi dan densifikasi mikrostruktur beton, kemudian cenderung melandai pada umur lanjut (42-56 hari). Beton bertulang menghasilkan nilai kecepatan gelombang ultrasonik (V) dan impedansi akustik (Z) lebih tinggi dibandingkan dengan beton tanpa tulangan karena pengaruh propagasi gelombang pada medium baja yang memiliki impedansi lebih besar. Lebih lanjut, koefisien transmisi amplitudo yang sedikit lebih besar dari satu ($T > 1$), menunjukkan bahwa mekanisme transmisi gelombang pada antarmuka beton dengan baja masih dipengaruhi oleh kontras impedansi akustik.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih diberikan sebesar-besarnya kepada Ketua Laboratorium Material Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Bali atas kemudahan akses material dan alat uji UPV selama penelitian.

Pustaka

- [1] Lencis U, Udris A, Kara De Maeijer P and Korjakins A 2024 Methodology for Determining the Correct Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete *Buildings* **14** 720
- [2] Espinosa A B, Revilla-Cuesta V, Skaf M, Faleschini F and Ortega-López V 2023 Utility of Ultrasonic Pulse Velocity for Estimating the Overall Mechanical Behavior of Recycled Aggregate Self-Compacting Concrete *Applied Sciences* **13** 874
- [3] Kim W, Jeong K, Choi H and Lee T 2022 Correlation Analysis of Ultrasonic Pulse Velocity and Mechanical Properties of Normal Aggregate and Lightweight Aggregate Concretes in 30–60 MPa Range *Materials* **15** 2952
- [4] Jiang J, Zhang D, Gong F and Zhi D 2022 Prediction of Ultrasonic Pulse Velocity for Cement, Mortar, and Concrete through a Multiscale Homogenization Approach *Materials* **15** 3241
- [5] Zhang Z and al. et 2021 Ultrasonic wave propagation in heterogeneous concrete: Effects of aggregates and pores *Constr. Build. Mater.* **296** 123742
- [6] Sun H and al. et 2023 Long-term ultrasonic monitoring of concrete affected by alkali-silica reaction *Struct. Health Monit.* **23**
- [7] Rocha A M and al. et 2025 Evaluation of the elastic modulus of concrete using non-destructive ultrasonic methods and the natural vibration method *Acta IMEKO* **14**
- [8] Basu S, Sasmal S and Kundu T 2024 Ultrasonic wave characteristics in multiscale cementitious materials at different stages of hydration *Ultrasonics* **142** 107397
- [9] Kharseh M, Moutassem F, Alamara K and Awad I 2024 Artificial neural networks-based ultrasonic pulse velocity prediction model for concrete structures *Cogent Eng.* **11**
- [10] Moutassem F and Miqdadi I 2023 Mathematical model for predicting the ultrasonic pulse velocity of concrete *Cogent Eng.* **10**
- [11] Zhang F, Pang K, Li J, Liu Q, Du J, Xiao H, Guo B and Zhang J 2024 Ultrasonic pulse velocity as a non-destructive measure for the projectile impact resistance of cementitious composites across a wide range of mix compositions *Journal of Building Engineering* **94** 109875
- [12] Aseem A and Ng C T 2021 Debonding detection in rebar-reinforced concrete structures using second harmonic generation of longitudinal guided wave *NDT & E International* **122** 102496
- [13] Oke J A and Abuel-Naga H 2023 Assessment of a Non-Destructive Testing Method Using Ultrasonic Pulse Velocity to Determine the Compressive Strength of Rubberized Bricks Produced with Lime Kiln Dust Waste *Geotechnics* **3** 1294–308
- [14] Candelaria Ma D E, Kee S-H, Yee J-J and Lee J-W 2020 Effects of Saturation Levels on the Ultrasonic Pulse Velocities and Mechanical Properties of Concrete *Materials* **14** 152
- [15] Karl F. Graff 2003 *Wave Motion in Elastic Solids* (New York: Dover Publications (reprint edition))
- [16] LARA-SAENZ A 2024 ON THE GENERALISED IMPEDANCE CONCEPT, ANALOGIES AND ACOUSTIC APPLICATIONS *Acoustics 1995* (Institute of Acoustics)
- [17] Hiremath N, Kumar V, Motahari N and Shukla D 2021 An Overview of Acoustic Impedance Measurement Techniques and Future Prospects *Metrology* **1** 17–38
- [18] Achenbach J D 2012 *Wave Propagation in Elastic Solids* (Oxford, UK: Elsevier)
- [19] Setyono E Y 2023 Ultrasonic Pulse Velocity Test Using BS Method And T-Method to Estimate Crack Depth of Concrete *LOGIC: Jurnal Rancang Bangun dan Teknologi* **23** 164–8
- [20] ASTM C597-22 2022 *Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete* (West Conshohocken, PA: ASTM International)
- [21] Kruger J and van der Westhuizen J-P 2023 Investigating the Poisson Ratio of 3D Printed Concrete *Applied Sciences* **13** 3225

- [22] Parihar H S, Shanker R and Singh V 2022 Effect of variation of steel reinforcement on ultrasonic pulse velocity prediction in concrete beam *Mater. Today Proc.* **65** 1486–90
- [23] Nanayakkara O, Najm H M and Sabri M M S 2022 Effect of Using Steel Bar Reinforcement on Concrete Quality by Ultrasonic Pulse Velocity Measurements *Materials* **15** 4565
- [24] Kim W, Jeong K, Choi H and Lee T 2022 Correlation Analysis of Ultrasonic Pulse Velocity and Mechanical Properties of Normal Aggregate and Lightweight Aggregate Concretes in 30–60 MPa Range *Materials* **15** 2952
- [25] Hong G, Oh S, Choi S, Chin W-J, Kim Y-J and Song C 2021 Correlation between the Compressive Strength and Ultrasonic Pulse Velocity of Cement Mortars Blended with Silica Fume: An Analysis of Microstructure and Hydration Kinetics *Materials* **14** 2476
- [26] Zhong B and Zhu J 2022 Applications of Stretching Technique and Time Window Effects on Ultrasonic Velocity Monitoring in Concrete *Applied Sciences* **12** 7130
- [27] Payan C, Abraham O and Garnier V 2018 Ultrasonic Methods *Non-Destructive Testing and Evaluation of Civil Engineering Structures* (Elsevier) pp 21–85
- [28] Sun H and Zhu J 2020 Nondestructive evaluation of steel-concrete composite structure using high-frequency ultrasonic guided wave *Ultrasonics* **103** 106096.