PENGARUH VARIASI MUTU BETON BERTULANG TERHADAP CEPAT RAMBAT GELOMBANG DENGAN MENGGUNAKAN METODE *NON DESTRUCTIVE TEST*

A.A. Lingga Ariya D*[1], Indradi Wijatmiko[2], Christin Remayanti Nainggolan[2]

[1]Mahasiswa/ Program Sarjana/ Jurusan Teknik Sipil/ Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
[2]Dosen/ Jurusan Teknik Sipil/ Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Korespondensi: linggaariya04@gmail.com

ABSTRACT

Preferably in testing, building structures need not be destroyed. Tests that can be used on the concrete can use non-destructive methods that do not damage the test objects. Examples of testing can use UPV tests that are aimed at knowing the quality of concrete from the pulse velocity. The test objects used in this study are reinforced concrete beams with dimensions 20 x 20 x 100 cm. Test objects are differentiated into 3 quality variations of reinforced concrete with quality of concrete12.5 MPa, 18.75 MPa, and 25 MPa. To conduct analysis of the concrete density used PUNDIT PL-200. Ultrasonic pulse velocity into parameters on this test. From the results of the tests, there are differences in the value of different coefficient of the R^2 determination. Acquired coefficient value of determination R^2 = 0.9076 in direct method. The coefficient value of determination R^2 = 0.8718 in the semi-direct method. Coefficient value of determination R^2 = 0.3042 at Indirect Method 2 point, and in indirect method 3 point the coefficient value of determination R^2 = 0.7524. From this research also obtained comparisons between the three methods, namely between the direct method and the semi-direct method, direct method and indirect method, also semi-direct method and indirect method.

Keywords : *beams, concrete, fle, compressive test, quality, Ultrasonic Pulse Velocity.*

1. PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir ini perkembangan dan pertumbuhan industri dalam bidang konstruksi sedang gencar sekali dilaksanakan di dunia dan juga di Indonesia. Seiring dengan terus berkembangnya industri konstruksi ini tentunya diperlukan juga pengembangan terhadap material yang akan digunakan, salah satunya adalah beton yang sangat sering digunakan dalam bidang konstruksi. Kuat tekan beton dapat diuji dengan dua metode yaitu *non-destructive* (tidak merusak) dan *destructive* (merusak). Perlu dilakukan pengujian terhadap beton dengan pengujian yang bersifat tidak merusak benda uji atau *non destructive test* karena beton merupakan komponen utama dalam struktural yang berfungsi untuk menahan dan menyebarkan beban-beban yang terjadi pada suatu bangunan. Untuk memperkirakan kekuatan tekan beton tanpa merusak struktur (*non-destruktif*) dapat juga dilakukan dengan tes UPV *(Ultrasonic Pulse Velocity)*. Alat yang digunakan pada tes ini dinamakan PUNDIT *(Portable Unit Non Destructive Indicator Tester)*. Alat ini dapat menghitung kecepatan gelombang ultrasonik pada beton. Dari data cepat rambat itu nantinya didapatkan hasil berupa homogenitas, kerapatan, dan ada atau tidaknya rongga di dalam beton. Pada penelitian sebelumnya belum didapatkan hasil mengenai pengaruh tulangan dilihat dari cepat rambat dan interpretasinya terhadap kerapatan yang berujung pada kualitas beton.

1.2 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Menganalisis pengaruh tulangan baja dan variasi mutu beton terhadap cepat rambat

gelombang dengan menggunakan alat UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*).

2. Menganalisis hubungan antara ketiga metode yang digunakan yaitu *direct*, *semi-direct*, dan *indirect method* berdasarkan karakteristik gelombang ultrasonik pada alat UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*) yang menggambarkan kerapatan material beton bertulang.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Beton Betulang

Beton bertulang adalah beton yang ditulangi dengan luas dan jumlah tulangan yang tidak kurang dari nilai minimum, yang disyaratkan dengan atau tanpa prategang, dan direncanakan berdasarkan asumsi bahwa kedua bahan yang digabungkan mampu bekerja bersama-sama dalam menahan gaya yang bekerja [1]. Beton bersifat kuat dalam menagan gaya tekan, akan tetapi lemah dalam menahan gaya tarik. Maka diperlukan tulangan yang mempunyai sifat utama kuat dalam menahan gaya tarikpada beton. Tulangan ini berguna untuk memperkuat daerah tekan pada balok [2].

2.2. Semen Portland Pozzolan

Semen portland pozzolan merupakan suatu semen hidrolis yang terdiri dari campuran yang homogen antara semen portland dengan pozzolan halus, yang di produksi dengan menggiling klinker semen portland dan pozolan bersama-sama, atau mencampur secara merata bubuk semen portland dengan bubuk pozolan, atau gabungan antara menggiling dan mencampur, dimana kadar pozolan 6% sampai dengan 40% massa semen portland pozzolan [3].

2.3. Agregat Kasar dan Halus

Agregat kasar adalah kerikil sebagai hasil disintegrasi alami dari batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 4,75 mm (No.4) sampai 40 mm (No. 1½) [4]. Langkah pertama yang harus dilakukan dalam mempersiapkan agregat kasar berupa batu pecah yaitu dengan melakukan pengayakan menggunakan saringan yang bertujuan untuk memisahkan agregat berdasarkan ukuran butiran. Setelah proses pengayakan selesai, batu pecah dicuci dengan tujuan membersihkan kotoran yang menempel pada agregat agar dapat meningkatkan kualitas agregat.

Agregat halus adalah butiran halus yang memiliki besar maksimal yaitu 4,75 mm [5]. Agregat halus juga berperan sebagai bahan pengisi dalam campuran beton untuk menghasilkan beton dengan kualitas yang baik. Fungsi utama dari agregat halus ini adalah sebagai pengisi rongga diantara agregat kasar, sehingga ikatan antar agregat menjadi semakin kuat.

2.4. Air

Air sangat mempengaruhi dalam proses pembuatan beton, karena air dapat bereaksi cepat dengan semen yang nantinya akan menjadi pasta untuk mengikat agregat. Kuat tekan beton juga dipengaruhi oleh kadar air. Jika kadar air terlalu banyak dapat mengakibatkan penurunan kekuatan beton. Kelebihan kadar air juga akan menyebabkan beton mengalami *bleeding*, yaitu air dan semen akan bergerak bersama-sama ke atas permukaan beton segar yang baru saja dituang. Hal ini dapat melemahkan kekuatan beton tersebut. Air pada campuran beton dapat berpengaruh pada *workability* dalam pengadukan beton, besar kecilnya nilai susut beton, dan kelangsungan reaksi terhadap semen portland.

2.5. Kuat Lentur Beton Bertulang

Kuat lentur beton adalah nilai tegangan yang dihasilkan dari momen lentur dibagi dengan momen penahan penampang balok uji. Kekuatan lentur beton juga ditentukan oleh pengaturan dari perbandingan semen, agregat kasar, agregat halus, dan air. Hubungan antara momen dan tegangan dapat dirumuskan melalui persamaan:

$$fr = \frac{M\max \cdot y}{Icr} \quad \text{.....(1)}$$

Dengan:

$$I_{cr} = \frac{1}{3}by^3 + nA(d-y)^2 \quad \text{.....(2)}$$

$$nA = n \times As \quad \text{.....(3)}$$

Perhitungan momen lentur nominal penampang dengan tulangan tekan sebagai tulangan semu dapat dirumuskan melalui persamaan:

$$Mn = 0{,}85\ f'c\ b\ a\ (d - \frac{a}{2}) \quad \text{.....(4)}$$

2.6. Pengujian UPV

Uji UPV atau *Ultrasonic Pulse Velocity test* adalah cara untuk memperkirakan kekerasan beton yang didasarkan pada hubungan cepat rambat gelombang melalui media beton dengan kekuatan tekan beton itu (*International Atomic Energy Agency*, Vienna, 2002). Uji UPV ini merupakan pengujian yang bersifat tidak merusak benda uji atau *Non-Destructive Test.* Pengujian bertujuan untuk mengetahui kuat tekan beton dengan cara mengukur kecepatan rambat gelombang longitudinal yang melalui beton tersebut.

Metode UPV ini telah berhasil digunakan untuk mengevaluasi kualitas dari beton selama lebih dari 60 tahun. Metode UPV ini dapat digunakan untuk mendeteksi retak internal dan cacat lainnya termasuk perubahan dari beton seperti penurunan kualitas beton akibat lingkungan kimia yang agresif dan pencairan.

2.7. Pengaruh Tulangan Baja Terhadap Cepat Rambat

Cepat rambat yang diukur dalam beton bertulang biasanya lebih tinggi daripada beton normal dengan komposisi yang sama. Hal ini disebabkan cepat rambat pada baja lebih cepat dua kali daripada cepat rambat pada beton normal dan pada kondisi tertentu gelombang pertama yang sampai pada *receiver* sebagian melewati beton dan sebagian lagi melewati baja. Peningkatan cepat rambat dipengaruhi oleh jarak antara *transducer* dengan tulangan baja, diameter tulangan dan jumlah tulangan.

2.8. Metode Pengujian

Pada saat pelaksanaan di lapangan, terdapat tiga metode dalam uji UPV. Adapun metode–metode tersebut antara lain:

a. *Direct transmission* (metode langsung), yaitu receiver dan transmitter diletakkan saling berhadapan secara tegak lurus pada dua permukaan beton yang berbeda, sehingga menghasilkan lintasan gelombang yang tegak lurus dengan permukaan transducer. Panjang lintasan merupakan hasil pengukuran antar tranducer yaitu jarak antara 2 sisi beton. Karena posisi receiver dan transmitter yang diletakkan secara paralel, maka metode langsung ini akan menghasilkan transmisi energi gelombang yang paling besar bila dibandingkan dengan dua metode lainnya. Oleh karena itu metode langsung ini dapat menghasilkan hasil yang paling baik.
b. *Semi-direct transmission* (metode semi langsung), yaitu receiver dan transmitter diletakkan pada dua sisi beton yang berbeda dan tidak berhadapan. Pengukuran panjang lintasan dapat dilakukan dengan mengukur jarak miring antara receiver dan transmitter. Hasil yang didapat dari metode ini tidak sebaik bila dibandingkan dengan metode langsung, tetapi bila jarak antara transmitter dan receiver tidak terlalu jauh, maka metode ini dapat menghasilkan data yang masih dapat dikatakan baik.
c. *Indirect transmission* (metode tidak langsung), yaitu receiver dan transmitter diletakkan sejajar pada permukaan beton sama. Biasanya metode ini dilakukan karena hanya ada satu sisi beton saja yang dapat digunakan untuk pengujian UPV. Dalam menggunakan metode tidak langsung ini, jarak antara receiver dan transmitter harus ditentukan terlebih dahulu. Untuk mendapatkan hasil yang mendekati dari metode langsung maka diperlukan faktor pengali agar hasil dari metode tidak langsung dapat mendekati hasil metode langsung.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Variabel Penelitian

Ketiga variabel yang dipakai pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Variabel kontrol :
   - Pengujian kuat lentur balok bertulang pada umur 28 hari.
   - Benda uji balok bertulang dengan dimensi 20 x 20 x 100 cm.
   - Nilai Slump Test (60-180 mm) → Struktur Pelat, Kolom, Balok dan Dinding
2. Variabel bebas:
   - Variasi mutu dalam *mix design* benda uji.
3. Variabel terikat :
   - Nilai cepat rambat gelombang pada *direct*, *semi-direct*, dan *indirect method.*

3.2. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan dimulai dari pengujian bahan (material), mix desain, pembuatan benda uji, sampai dengan

pengolahan data dan kesimpulan. Secara terperinci dapat dilihat pada **Gambar 1**.

3.3. Rancangan Penelitian

Pada penelitian ini menggunakan benda uji balok yang menjadi benda uji utama dengan dimensi 20 x 20 x 100 cm. Digunakan 6 benda uji yang dibagi menjadi 3 mutu yang berbeda, masing masing mutu berjumlah sebanyak 2 benda uji. Rincian komposisi benda uji dapat dilihat pada **Tabel 1**.

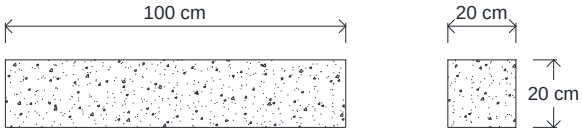
Tabel 1. Komposisi rasio pada *mix design* beton

Beton	Semen	Air	Agregat Kasar	Agregat Halus	Jumlah
f'c 12,5 Mpa	1	0,899	3,149	2,386	2
f'c 18,75 Mpa	1	0,763	2,712	1,854	2
f'c 25 Mpa	1	0,7	2,505	1,609	2

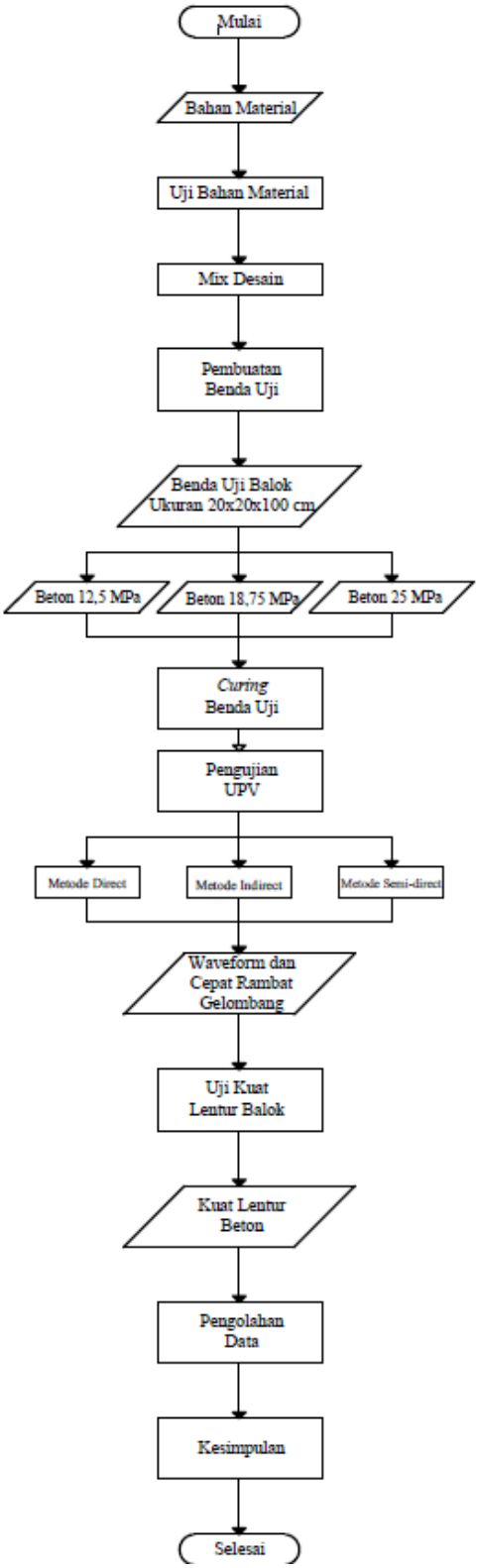
3.4. Pembuatan Benda Uji

Langkah-langkah yang dilakukan untuk membuat benda uji yaitu:

1. Persiapkan semua bahan-bahan dasar yang akan digunakan nantinya sebagai *mix design*.
2. Pengujian terhadap semua bahan dasar yang akan digunakan menjadi *mix design*.
3. Kemudian semua bahan tadi dimasukkan ke dalam alat pengaduk yang diaduk kurang lebih selama 15 menit dengan tujuan campuran beton tersebut menjadi homogen.
4. Setelah pengadukan selesai, diambil sebagian adonan tersebut untuk dilakukan uji slump.
5. Siapkan cetakan dan bagian dalam cetakan dioleskan oli agar beton yang nantinya sudah mengeras mudah dilepaskan dari cetakan.
6. Campuran beton kemudian dituangkan kedalam cetakan.



Gambar 1. Dimensi balok rencana



Gambar 1. Tahapan penelitian

3.5. Pengujian UPV

Pada penelitian kali ini pengujian UPV yang dilakukan menggunakan alat Pundit PL-200. Pengujian akan dilakukan terhadap benda uji beton yang sudah berumur 28 hari. Metode yang digunakan dalam pengujian kali ini menggunakan 3 metode yaitu metode *direct transmisson*, *semi-direct transmission*, dan *indirect transmission.* Penelitian ini menggunakan *transducer* standar dengan frekuensi 54 kHz.

Beberapa prosedur yang harus dilakukan dalam pengujian UPV ini adalah:

1. Memilih permukaan beton yang bagus atau halus.
2. Menentukan titik yang akan diuji.
3. Meratakan atau menghaluskan permukaan benda uji.
4. Melakukan kalibrasi alat uji UPV dengan tujuan pembacaan waktu tempuh *transmitter* sama dengan *receiver*.
5. Menentukan jarak *transmitter* dan *receiver* pada layar Pundit PL-200.
6. Sebelum diuji, terlebih dahulu oleskan *ultrasonic gel* (*couplant*) pada permukaan benda uji.
7. Pengujian dilakukan pada titik yang sudah di tentukan.
8. Pengujian UPV selesai dan didapatkan hasil berupa kecepatan rambat gelombang ultrasonik.

3.6. Metode Pengumpulan Data

Dari pengujian yang telah dilakukan didapatkan data-data yang diperlukan. Data yang didapatkan berupa gelombang atau *waveform* dari gelombang yang diterima receiver pada setiap benda uji. Data ini kemudian dapat diolah dengan menggunakan aplikasi PL-Link pada komputer. Setelah pengolahan data selesai, didapatkan hasil berupa parameter cepat rambat gelombang.

3.7. Analisis Data

Tujuan dari penelitian ini untuk menganalisis kerapatan dari suatu beton berdasarkan waktu transmisi dan cepat rambat dengan alat UPV.

Pada penelitian ini parameter kerapatan beton didasarkan pada nilai kuat lentur dari beton. Data-data parameter kuat gelombang dan hasil kuat lentur yang telah didapatkan dari hasil pengujian kemudian diolah kembali dengan standar deviasi untuk menghilangkan data-data yang kurang tepat. Dari data-data yang didapatkan kemudian dilakukan penyusunan grafik dan tabel untuk mendapatkan hubungan antara parameter kuat lentur dengan gelombang dari beton.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

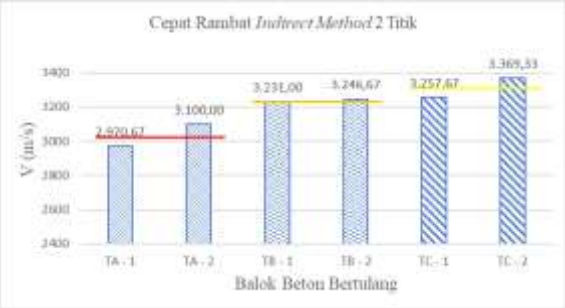
4.1. Hasil Pengujian UPV

Pengujian UPV ini menggunakan alat PUNDIT PL-200. Dilakukan tiga jenis metode pengujian, yaitu pengujian dengan metode langsung (*direct*), metode semi-langsung (*semi-direct*) dan metode tidak langsung (*indirect*). Dari ketiga metode yang digunakan nantinya akan dihasilkan nilai kecepatan rambat gelombang yang berbeda, dan metode langsung (*direct*) dapat menghasilkan nilai cepat rambat gelombang yang lebih besar apabila dibandingkan dengan dua metode lainnya. Pada pengujian ini jarak yang ditetapkan antara *transducer* adalah 20 cm untuk metode langsung (*direct*) dan metode tidak langsung (*indirect*). Untuk metode semi-langsung (*semi-direct*) ditetapkan jarak antara *transducer* adalah 22 cm. Setelah didapatkan hasil kecepatan dari masing-masing metode, data kemudian diolah dengan menggunakan software PL-Link.

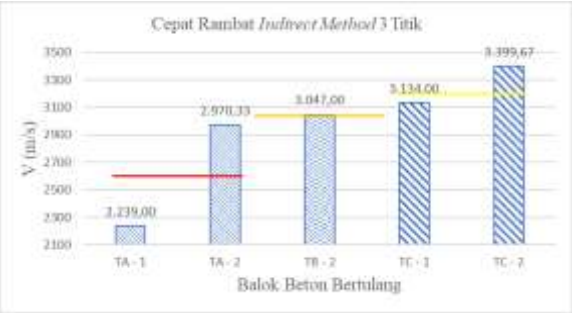
Didapatkan nilai rata-rata cepat rambat gelombang antara 2300 m/s sampai dengan 4100 m/s. Dilakukan beberapa kali pengujian UPV terhadap 6 sampel benda uji balok bertulang.

Gambar 2. Grafik nilai cepat rambat gelombang dengan *direct method*

Gambar 3. Grafik nilai cepat rambat gelombang dengan *semi-direct method*



Gambar 4. Grafik nilai cepat rambat gelombang dengan *indirect method* 2 titik



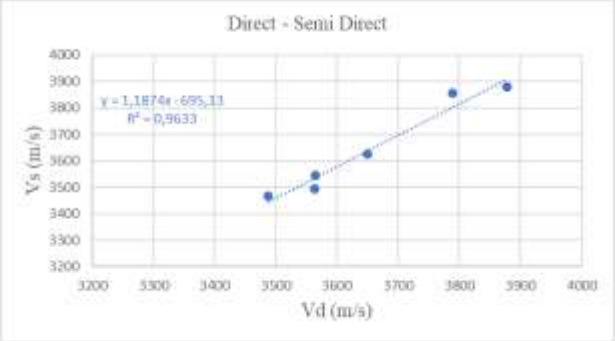
Gambar 5. Grafik nilai cepat rambat gelombang dengan *indirect method* 3 titik

Berdasarkan **Gambar 2 – Gambar 5** didapatkan nilai cepat rambat gelombang yang meningkat seiring dengan semakin tinggi mutu benda uji. Hal ini sesuai dengan hipotesa awal bahwa semakin tinggi mutu beton, maka cepat rambat yang dihasilkan akan semakin bagus juga.

4.2. Korelasi Hasil Pengujian UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*) antara *Direct Method* dengan *Semi-direct Method*

Dari ketiga metode pengujian UPV tersebut didapatkan hasil cepat rambat gelombang yang selanjutnya digunakan untuk mencari korelasi antara dua metode dari tiga metode yang ada. Penjelasan korelasi antara metode *direct* dan *semi-direct* akan dipaparkan pada sub bab ini.

Dari **Gambar 6** didapatkan hubungan linier nilai cepat rambat gelombang antara *direct method* dan *semi-direct method*. Persamaan yang didapatkan dari hubungan kedua metode tersebut yaitu Vs = 1,1874Vd – 695,13. Nilai R^2 yang didapatkan sebesar 0,9633.

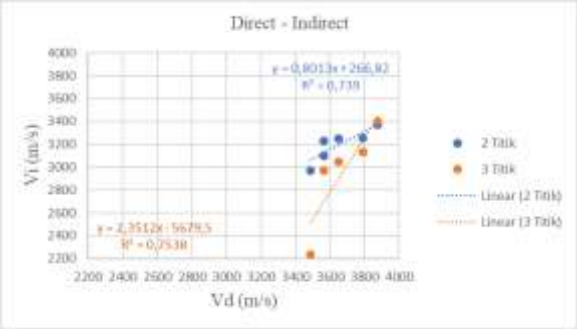


Gambar 6. Grafik hubungan antara nilai cepat rambat gelombang pada *direct method* dan *semi-direct method*

4.3. Korelasi Hasil Pengujian UPV (Ultrasonic Pulse Velocity) antara *Direct Method* dengan *Indirect Method*

Dari ketiga metode pengujian UPV tersebut didapatkan hasil cepat rambat gelombang yang selanjutnya digunakan untuk mencari korelasi antara dua metode dari tiga metode yang ada. Penjelasan korelasi antara metode *direct* dan *indirect* akan dipaparkan pada sub bab ini.

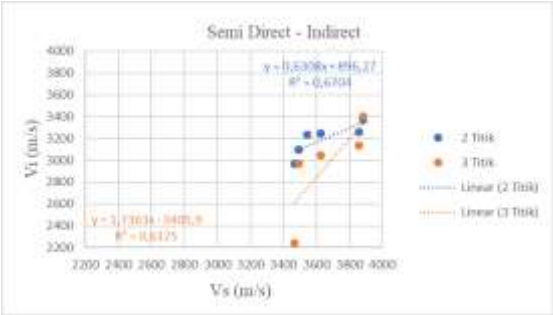
Dari **Gambar 7** didapatkan hubungan linier nilai cepat rambat gelombang antara *direct method* dan *indirect method* pada 2 titik dan 3 titik. Persamaan yang didapatkan dari hubungan kedua metode tersebut yaitu Vi_2 = 0,8013Vd + 266,82 dengan nilai R^2 yang didapatkan sebesar 0,739 dan Vi_3 = 2,3512Vd – 5679,5 dengan nilai R^2 yang didapatkan sebesar 0,7538.



Gambar 7. Grafik hubungan antara nilai cepat rambat gelombang pada *direct method* dan *indirect method*

4.4. Korelasi Hasil Pengujian UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*) antara *Semi-direct Method* dengan *Indirect Method*

Dari ketiga metode pengujian UPV tersebut didapatkan hasil cepat rambat gelombang yang selanjutnya digunakan untuk mencari korelasi antara dua metode dari tiga metode yang ada. Penjelasan korelasi antara metode *semi-direct* dan *indirect* akan dipaparkan pada sub bab ini.



Gambar 8. Grafik hubungan antara nilai cepat rambat gelombang pada *semi-direct method* dan *indirect method*

Dari **Gambar 8** didapatkan hubungan linier nilai cepat rambat gelombang antara *semi-direct method* dan *indirect method* pada 2 titik dan 3 titik. Persamaan yang didapatkan dari hubungan kedua metode tersebut yaitu Vi_2 = 0,6308Vs + 896,27 dengan nilai R^2 yang didapatkan sebesar 0,6704 dan Vi_3 = 1,7363Vs – 3405,9 dengan nilai R^2 yang didapatkan sebesar 0,6125.

4.5. Penjabaran Hubungan Semua Metode dari Hasil Pengujian UPV

Dari ketiga metode pengujian UPV tersebut didapatkan hasil cepat rambat gelombang yang selanjutnya digunakan untuk mencari hubungan antara nilai cepat rambat yang dihasilkan. Persamaan yang didapatkan setelah data diolah disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Perbandingan nilai UPV

Sampel	Vs / Vd	Vi_2 / Vd	Vi_3 / Vd	Vi_2 / Vs	Vi_3 / Vs
TA - 1	0,99	0,85	0,64	0,86	0,65
TA - 2	0,98	0,87	0,83	0,89	0,85
TB - 1	0,99	0,91		0,91	
TB - 2	0,99	0,89	0,84	0,90	0,84
TC - 1	1,02	0,86	0,81	0,84	0,81
TC - 2	1,00	0,87	0,88	0,87	0,88
Rata-rata	1,00	0,87	0,80	0,88	0,80
Presentase	100%	87%	80%	88%	80%

Dari data yang disajikan pada **Tabel 2** dihasilkan persamaan dalam bentuk presentase yaitu Vs = 100% Vd, Vi_2 = 87% Vd, Vi_3 = 80% Vd, Vi_2 = 88% Vs, dan Vi_3 = 80% Vs. Kecepatan rambat gelombang antara *direct method* dan *semi-direct method* yang dihasilkan hampir sama, karena hasil perbandingan kedua metode tersebut mendekati nilai satu. Apabila dibandingkan dengan *indirect method*, maka nilai yang dihasilkan lebih kecil yaitu 0,87 pada 2 titik dan 0,80 pada 3 titik. Berdasarkan BS 1881: 203 kecepatan rambat *indirect method* selalu lebih rendah daripada kecepatan rambat dengan *direct method* pada beton yang sama. Perbedaan ini dapat bervariasi antara 5% sampai dengan 20% tergantung pada kualitas beton yang diuji.

4.6. Hubungan Antara Cepat Rambat Gelombang dengan Mutu Beton pada Direct Method

Dari data yang diperoleh berupa nilai cepat rambat gelombang dengan metode *direct* dan mutu beton, kemudian dicari hubungan antara kedua nilai tersebut. Setelah data-data diolah, nantinya akan didapatkan sebuah persamaan.

Berdasarkan grafik yang ditampilkan pada **Gambar 9** dapat disimpulkan semakin tinggi mutu beton maka cepat rambat gelombang yang dihasilkan akan semakin tinggi. Didapatkan juga sebuah persamaan $f'c = 0{,}097e^{0{,}0015Vd}$ dari grafik tersebut, dan mempunyai nilai R^2 sebesar 0,9076.

Gambar 9. Grafik hubungan antara nilai cepat rambat gelombang pada *direct method* dengan mutu beton

4.7. Hubungan Antara Cepat Rambat Gelombang dengan Mutu Beton pada *Semi-direct Method*

Dari data yang diperoleh berupa nilai cepat rambat gelombang dengan metode *semi-direct* dan mutu beton, kemudian dicari hubungan antara kedua nilai tersebut. Setelah data-data diolah, nantinya akan didapatkan sebuah persamaan.

Berdasarkan grafik yang ditampilkan pada **Gambar 10**, maka hasil penelitian ini sudah sesuai dengan hipotesa awal yaitu semakin tinggi mutu beton maka cepat rambat gelombang yang dihasilkan akan semakin tinggi. Dari grafik tersebut didapatkan juga sebuah persamaan $f'c = 0{,}3063e^{0{,}0012Vs}$ dan mempunyai nilai R^2 sebesar 0,8718.

Gambar 10. Grafik hubungan antara nilai cepat rambat gelombang pada *semi-direct method* dengan mutu beton

4.8. Hubungan Antara Cepat Rambat Gelombang dengan Mutu Beton pada *Indirect Method*

Dari data yang diperoleh berupa nilai cepat rambat gelombang dengan metode *indirect* pada 2 titik dan 3 titik dan mutu beton, kemudian dicari hubungan antara kedua nilai tersebut. Setelah data-data diolah, nantinya akan didapatkan sebuah persamaan.

Gambar 11. Grafik hubungan antara nilai cepat rambat gelombang pada *indirect method* 2 titik dengan mutu beton

Gambar 12. Grafik hubungan antara nilai cepat rambat gelombang pada *indirect method* 3 titik dengan mutu beton

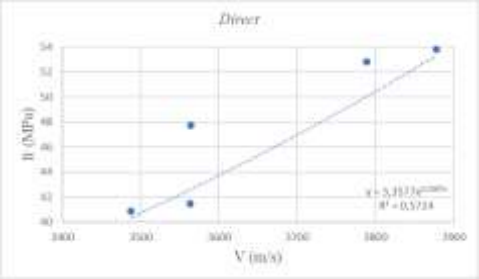
Berdasarkan grafik yang ditampilkan pada **Gambar 11** dan **12** dapat disimpulkan semakin tinggi mutu beton maka cepat rambat gelombang yang dihasilkan akan semakin tinggi. Didapatkan juga sebuah persamaan pada *metode indirect* 2 titik yaitu $f'c = 1{,}5017e^{0{,}0009Vi2}$ dan mempunyai nilai R^2 sebesar 0,3042. Pada metode indirect 3 titik didapatkan persamaan $f'c = 4{,}9906e^{0{,}0005Vi3}$ dari grafik tersebut, dan mempunya nilai R^2 sebesar 0,7524.

4.9. Hubungan Antara Cepat Rambat Gelombang dengan Kuat Lentur Beton

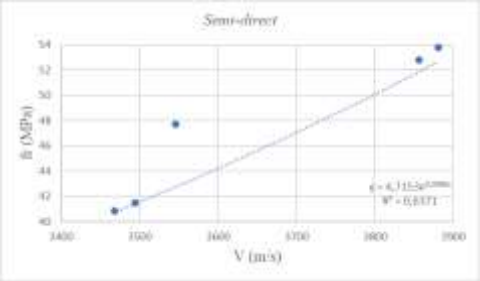
Hubungan antara mutu beton dan cepat rambat gelombang dapat dibedakan menjadi tiga berdasarkan metode pengujian yang dilakukan, yaitu metode *direct*, *indirect*, dan *semi-direct*. Data-data yang dihasilkan dari pengujian tersebut kemudian diolah untuk dapat mencari hubungan antara kuat lentur beton dan cepat rambat gelombang.

Berdasarkan grafik yang ditampilkan pada **Gambar 13** sampai **16** hasil yang dapat disimpulkan adalah semakin besar nilai kuat lentur maka cepat rambat gelombang yang dihasilkan akan semakin tinggi. Nilai kuat lentur yang besar dikarenakan benda uji balok memiliki kerapatan antar material yang baik, sehingga saat gelombang dipantulkan akan langsung melewati material bukan melewati

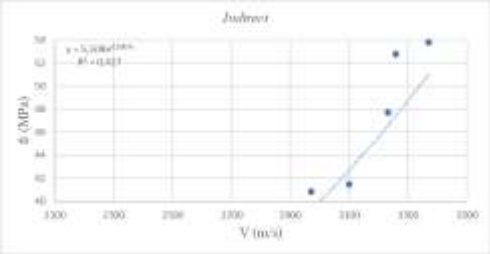
rongga-rongga yang ada. Apabila gelombang melewati rongga, maka gelombang akan terpecah dan pembacaan hasil cepat rambat gelombang menjadi berkurang.



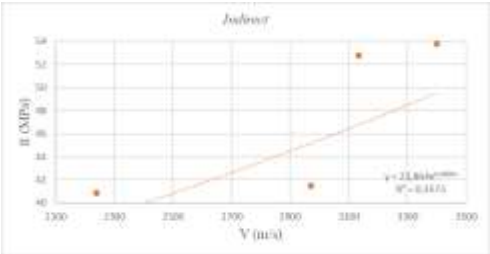
Gambar 13. Hubungan antara nilai kuat lentur dan kecepatan gelombang dengan menggunakan *direct method*



Gambar 14. Hubungan antara nilai kuat lentur dan kecepatan gelombang dengan menggunakan *semi-direct method*



Gambar 15. Hubungan antara nilai kuat lentur dan kecepatan gelombang dengan menggunakan *indirect method* 2 titik



Gambar 16. Hubungan antara nilai kuat lentur dan kecepatan gelombang dengan menggunakan *indirect method* 3 titik

Setelah mendapatkan data hubungan antara cepat rambat gelombang dengan kuat lentur beton, maka data-data tersebut dapat digabungkan. Dari data-data yang diperoleh didapatkan sebuah persamaan $fr = ae^{bV}$, fr adalah kuat lentur, sedangkan V adalah kecepatan rambat gelombang. Hasil hubungan antara cepat rambat gelombang dan kuat lentur beton disajikan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Hubungan antara cepat rambat gelombang dengan kuat lentur

Metode	Persamaan	R^2
Direct	$fr = 3{,}3577e^{0{,}0007Vd}$	0,5724
Semi-Direct	$fr = 4{,}7153e^{0{,}0006Vs}$	0,6371
Indirect 2 Titik	$fr = 5{,}508e^{0{,}0007Vi2}$	0,427
Indirect 3 Titik	$fr = 23{,}864e^{0{,}0002Vi3}$	0,3573

5. PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai cepat rambat gelombang pada ketiga metode yang digunakan yaitu direct, semi-direct, dan indirect mengalami peningkatan seiring semakin tinggi mutu beton pada benda uji. Hal ini membuktikan hipotesa awal bahwa semakin tinggi mutu beton yang berarti kerapatan beton semakin baik maka cepat rambat yang dihasilkan akan semakin bagus. Didapatkan nilai rata-rata kuat tekan beton pada mutu A sebesar 20,49 Mpa, pada mutu B sebesar 23,84 Mpa dan pada mutu C sebesar 32,18 Mpa. Dihasilkan beberapa persamaan hubungan antara mutu beton dan nilai cepat rambat pada ketiga metode pengujian UPV yang dapat digunakan untuk umum nantinya.
2. Kecepatan rambat gelombang antara *direct method* dan *semi-direct method* yang dihasilkan hampir sama, karena hasil perbandingan kedua metode tersebut mendekati nilai satu. Apabila dibandingkan dengan *indirect method*, maka nilai yang dihasilkan lebih kecil yaitu 0,87 pada 2 titik dan 0,80 pada 3 titik. Dihasilkan persamaan dalam bentuk presentase yaitu Vs = 100% Vd, Vi_2 = 87% Vd, Vi_3 = 80% Vd, Vi_2 = 88% Vs, dan Vi_3 = 80% Vs.

5.2. Saran

Berdasarkan penelitian terhadap benda uji silinder dan balok bertulang dengan variasi mutu, yang menggunakan alat uji UPV maka terdapat beberapa saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutanya, yaitu:

1. Didapatkan nilai koefisien determinasi R^2 yang relatif kecil pada beberapa mutu beton, sehingga perlu disempurnakan lagi.
2. Perlunya penambahan benda uji pada masing-masing mutu beton dengan tujuan data yang dihasilkan lebih akurat dan hasil penelitian dapat digunakan untuk umum.
3. Pada saat pengujian UPV berlangung diperlukan kestabilan tumpuan, perletakan transduser yang tepat dan banyak cairan couplant untuk menghindari kesalahan pembacaan data dan data yang dihasilkan bisa lebih akurat.
4. Dalam proses pembuatan *mix design* dan pemadatan beton dibutuhkan kontrol yang baik untuk menghindari faktor yang dapat mempengaruhi data penelitian yang dilakukan.

6. DAFTAR PUSTAKA

[1] Departemen Pekerjaan Umum. 2002. *SNI 03-2847 Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung.* Bandung: Yayasan Lembaga Penyelidikan Masalah Bangunan.

[2] Nawy, Edward G. 1990. *Beton Bertulang – Suatu Pendekatan Dasar*. Suryoatmono, Ir Bambang. Bandung. PT Eresco. Terjemahan dari: *Reinforced Concrete – A Fundamental Approach.*

[3] Badan Standardisasi Nasional. 2004. *Semen portland pozzolan*. Jakarta: BSNi.

[4] Badan Standardisasi Nasional. 2008. SNI 1970-2008 *Cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat halus.* Jakarta: BSNi.

[5] Badan Standardisasi Nasional. 2002. SNI 03-6820-2002 *Spesifikasi agregat halus untuk pekerjaan adukan dan plesteran dengan bahan dasar semen.* Jakarta: BSNi.