

HUBUNGAN CEPAT RAMBAT GELOMBANG ULTRASONIK TERHADAP MUTU BETON TANPA AGREGAT KASAR

David Chandra¹ dan Daniel Christianto²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
Email: davidc.ts@stu.untar.ac.id

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
Email: daniel@untar.ac.id

ABSTRAK

Dalam penelitian ini mempelajari mengenai hubungan cepat rambat gelombang ultrasonik terhadap mutu beton tanpa agregat kasar. Campuran beton yang dibuat tidak menggunakan agregat kasar, hanya semen OPC, pasir silika, air, *silica fume*, tepung marmer dan *superplasticizer*. Tujuan tidak digunakannya agregat kasar adalah untuk meningkatkan homogenitas material penyusun beton dan meningkatkan kepadatan kering beton. Maka dari itu dalam material penyusun terdapat tepung marmer sebagai *filler* dan *superplasticizer* untuk meningkatkan kepadatan kering, ada juga *silica fume* juga sebagai *filler* dan meningkatkan kepadatan kering. Benda uji yang dibuat adalah beton tanpa agregat kasar berbentuk silinder dengan diameter 10 cm dan tinggi 20 cm. Nilai cepat rambat didapatkan dengan menggunakan salah satu metode *non-destructive test* (NDT) yaitu tes *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) dengan cara *direct/langsung*. Nilai kuat tekan didapatkan dengan melakukan uji tekan pada benda uji. Setelah nilai kecepatan dan kuat tekan didapatkan, dibuatlah diagram pencar dan regresinya untuk mendapatkan formula kuat tekan yang baru. Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa jika nilai cepat rambat semakin tinggi maka nilai mutu beton cenderung tinggi juga, semakin berat massa benda uji maka nilai cepat rambat dan kuat tekan cenderung tinggi juga. Dihilangkan juga formula kuat tekan ($f'c$) dari hasil regresi yaitu : $f'c = -55.578V^2 + 558.91V - 1322$ dengan satuan standard international.

Kata kunci: Beton tanpa Agregat Kasar, Metode Non-destruktif Tes (NDT) , Cepat Rambat Gelombang Ultrasonik, UPV

1. PENDAHULUAN

Tidak dapat dipungkiri bahwa negara kita, Indonesia merupakan salah satu negara berkembang dari 195 negara yang terdaftar dalam PBB (Perserikatan Bangsa-Bangsa). Saat ini Indonesia sebagai negara berkembang sedang gencar melakukan pembangunan infrastruktur dengan konsep Indonesia sentris yang bertujuan untuk memudahkan akses masyarakat yang berada di daerah terpencil untuk memenuhi kebutuhannya dan meningkatkan kesejahteraan dalam ekonomi maupun keseragaman dalam kemajuan infrastruktur. Pembangunan infrastruktur ini tentunya tidak lepas dari pemakaian bahan-bahan dari teknologi bahan konstruksi seperti semen, agregat halus, agregat kasar, air, dan bahan tambah atau *admixtures* lainnya. Bahan-bahan tersebut akan digunakan untuk membuat beton yang merupakan komponen penting membangun suatu bangunan seperti pada struktur bangunan antara lain elemen balok, kolom, fondasi, pelat, perekatan dinding bata, perekatan keramik pada lantai dan lain-lain. Pemilihan beton sebagai bahan konstruksi tentunya memiliki beberapa alasan, seperti beton memiliki umur layan yang panjang dengan biaya perawatan yang murah, mudah dibentuk sesuai dengan bentuk penampangnya dan tentunya dapat didesain sesuai nilai mutu yang diinginkan.

Seiring berjalannya waktu maka kebutuhan penggunaan beton dengan mutu tinggi pun cepat lambat akan digunakan pada konstruksi. Kriteria beton mutu tinggi dimulai dengan nilai kuat tekan lebih besar 41 MPa sedangkan untuk mutu beton biasa nilainya dibawah 41 MPa hingga 21 MPa. Dalam penelitian ini akan dibuatnya benda uji dengan beton tanpa agregat kasar dengan tujuan untuk memperbaiki homogenitas beton dengan tidak menggunakan agregat kasar karena pada dasarnya beton merupakan material yang heterogen yang terdiri dari beberapa unsur penyusun yang berbeda jenis dan ukuran butiran agregat, maka dari itu beton ini dibuat tanpa agregat kasar dengan menggunakan pasir silika dengan lolos saringan no. 30 dan no. 50 dan *filler* berupa *silica fume* dan tepung marmer. Tujuan lainnya beton dibuat tanpa agregat kasar adalah untuk meningkatkan kerapatan kepadatan kering. Pengembangan kepadatan yang utama adalah pengurangan kadar air, tetapi kadar air menentukan kemudahan pengerjaan beton. Pada beton normal kepadatan dapat ditingkatkan dengan penambahan partikel pengisi seperti *fly*

ash, silica fume dan penggunaan *superplastizicer*. Penggunaan partikel pengisi seperti *silica fume* yang optimal ± 25 % dari berat semen (Naibaho, 2013).

Dikarenakan beton merupakan salah satu elemen penting dalam suatu struktur maka kekuatannya harus diperiksa secara berkala agar bangunan dapat berfungsi dengan baik. Pemeriksaan ini juga dapat dilakukan dengan berbagai cara, ada dengan cara yang merusak dan tidak merusak beton itu sendiri. dalam penelitian ini, peneliti akan meneliti salah satu metode tidak merusak yaitu *ultrasonic pulse velocity test*. Metode *ultrasonic pulse velocity test* sendiri bekerja berdasarkan pengukuran kecepatan gelombang ultrasonik dari saat dikirim hingga diterima kembali oleh alat tersebut. Hasil *ultrasonic pulse velocity test* dapat digunakan untuk melihat seberapa bagus kualitas dari suatu beton. Semakin cepat gelombang ultrasonik yang diterima kembali setelah dikirim, maka semakin bagus juga kualitas beton tersebut. Maka dari itu tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan korelasi hubungan antara kuat tekan beton tanpa agregat dengan cepat rambat gelombang.

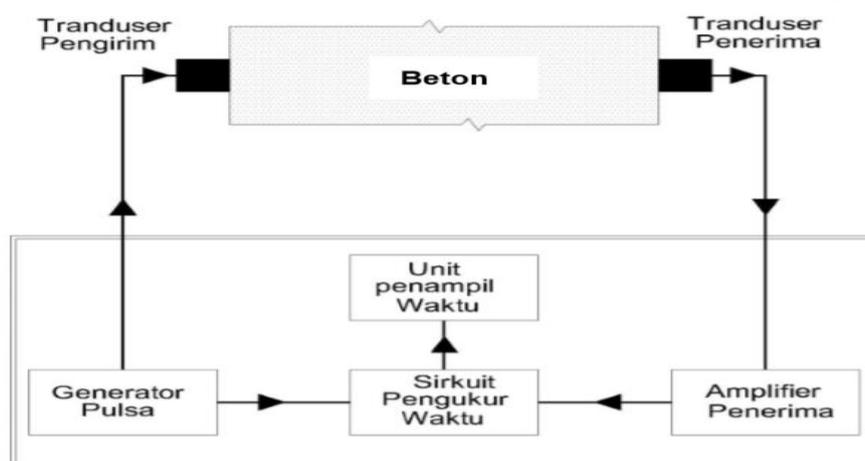
Sejarah tes *ultrasonic pulse velocity* (UPV)

Sejak pertengahan tahun 1940-an, *ultrasonic pulse velocity test* (UPV) sudah mulai diperkenalkan di Amerika dengan mengujinya pada suatu beton. Pada hasil laporannya, ternyata kecepatan sangat bergantung pada nilai modulus elastisitasnya, sehingga sampai saat ini tes UPV hanya dipakai sebatas untuk mengetahui retakan dalam beton dan kualitas suatu beton. Untuk melakukan tes UPV ini digunakan alat ujinya yaitu PUNDIT (*Pulse Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester*). Hasil dari alat uji PUNDIT berupa kecepatan pulsa yang dilepaskan antar *transducer*. Salah satu keunggulan pada tes UPV ialah tes ini tidak menyebabkan kerusakan atau perubahan fisik pada benda uji.

Pengukuran cepat rambat gelombang ultrasonik yang merambat pada beton juga dapat untuk mencari tahu beberapa hal (International Atomic Energy Agency, 2002), antara lain:

- Mengetahui keseragaman dari beton pada suatu struktur maupun antar struktur.
- Mengukur perubahan yang terjadi pada suatu struktur dari waktu ke waktu.
- Mengetahui mutu beton dengan korelasi antara kecepatan gelombang ultrasonik dan kuat tekan beton.
- Mengetahui modulus elastisitas dari beton dan *poisson ratio* pada beton.

Pada umumnya cara kerja alat PUNDIT (International Atomic Energy Agency, 2002) adalah tranduser memberi getaran gelombang longitudinal melalui cairan pelumas yang berwujud gemuk ataupun sejenis pasta selulose, yang dioleskan pada permukaan beton sebelum tes dimulai. Saat gelombang merambat melalui media yang berbeda, yaitu gemuk dan beton, pada batas gemuk dan beton akan terjadi pantulan gelombang yang merambat dalam bentuk gelombang transversal dan longitudinal. Gelombang transversal merambat tegak lurus lintasan dan gelombang longitudinal merambat sejajar lintasan. Gelombang yang pertama kali yang diterima oleh tranduser adalah gelombang longitudinal. Oleh tranduser, gelombang ini diubah menjadi sinyal gelombang elektronik yang dapat dideteksi oleh tranduser penerima, sehingga waktu tempuh gelombang dapat diukur. Terlihat pada Gambar 1 bagaimana cara kerja alat PUNDIT.



Gambar 1. Proses yang terjadi saat pengambilan data (Badan Standardisasi Nasional, 2012)

Faktor faktor yang mempengaruhi hasil UPV

Pada *ultrasonic pulse velocity test* terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi hasilnya (Malhotra, 2004), antara lain:

- a. Kondisi material penyusun beton
 - 1) Ukuran, tipe, kandungan dan tingkat gradasi agregat. Kecepatan pulsa pada pasta semen, lebih rendah daripada menggunakan agregat. Beton dengan agregat berbentuk bulat memberikan hasil yang rendah dan beton dengan batu kapur memberikan hasil yang paling tinggi.
 - 2) Tipe semen dan faktor air semen. Variasi pada banyaknya jumlah semen dan tingginya tingkat hidrasi memberikan hasil kecepatan yang berbeda-beda.
 - 3) Bahan tambahan campuran. Bahan tambahan seperti kalsium klorida menghasilkan nilai yang lebih besar.
 - 4) Usia beton.
- b. Kondisi lainnya
 - 1) Kontak dengan transduser. Pengujian dengan metode langsung dan metode tidak langsung memberikan hasil dengan perbedaan yang cukup besar.
 - 2) Suhu dan kelembaban beton. Variasi dari temperatur dan kelembaban memberikan hasil yang berbeda-beda. Nilai pada beton yang kering lebih tinggi sekitar 5% daripada beton yang lebih lembab.
 - 3) Lebar, bentuk dan ukuran benda uji yang diukur. Semakin panjang jarak antar transduser, maka waktu rambatan yang dibutuhkan akan semakin besar.
 - 4) Tegangan pada benda uji dan adanya tulangan. Dengan adanya tulangan, nilai yang terbaca akan lebih tinggi. Karena itu sebisa mungkin tulangan harus dihindarkan.

Prosedur pengambilan data

Dalam pengambilan data menggunakan alat uji PUNDIT, ada tiga cara untuk melakukannya, yaitu cara langsung (Gambar 2.a), semi-langsung (Gambar 2.b) dan tidak langsung (Gambar 2.c). Pada umumnya saat tes UPV dilakukan di lapangan, cara yang digunakan adalah cara tidak langsung, karena disebabkan oleh beberapa keterbatasan. Sedangkan pada penelitian ini, cara yang digunakan adalah cara langsung karena cara ini menghasilkan hasil yang lebih meyakinkan daripada dua cara lainnya (Bungey, Milard, & Grantham, 2006).

Interprestasi nilai UPV

Dari hasil percobaan UPV, akan didapatkan nilai waktu dalam satuan μs yang akan digunakan untuk mencari nilai kecepatan menggunakan rumus

$$V = \frac{L}{t} \quad (1)$$

Dengan nilai V = cepat rambat gelombang (m/s), L = panjang lintasan (m) dan t = waktu yang didapatkan dari tes UPV (μs)

Pada buku (Halliday, Resnick, & Walker, 2005) memuat sebuah fungsi dasar cepat rambat gelombang longitudinal berdasarkan suatu pegas yaitu:

$$V = \sqrt{\frac{\tau}{\phi}} = \sqrt{\frac{\text{Elastic Property}}{\text{Inertia Property}}} \quad (2)$$

Jika gelombang longitudinal merambat pada benda padat, maka fungsi kecepatan akan menjadi:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{\text{Modulus elastisitas}}{\text{Berat jenis}}} \quad (3)$$

$$E = 4700\sqrt{f'c} \quad (4)$$

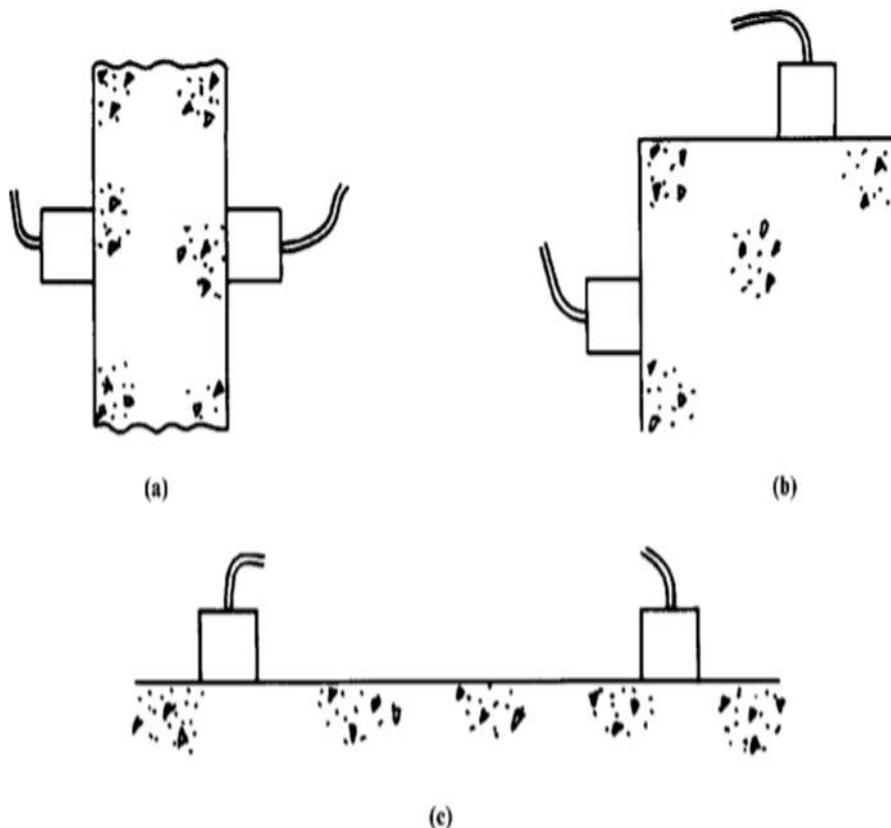
Dalam buku (Neville, 2011) dikatakan bahwa beton harus menggunakan modulus dinamis (E_d) sehingga rumus kecepatan rambat menjadi:

$$V^2 = \frac{E_d(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)} \quad (5)$$

Berikut adalah hubungan modulus statis dan dinamis sehingga nantinya bisa didapatkan nilai kuat tekan ($f'c$) (Lydon & Balendran, 1986):

$$E = 0.83E_d \quad (6)$$

Dengan keterangan semua persamaan diatas adalah V = cepat rambat gelombang (m/s), E = Modulus elastisitas statis (N/mm^2), E_d = Modulus elastisitas dinamis (N/mm^2), ρ = Berat jenis (Kg/m^3)



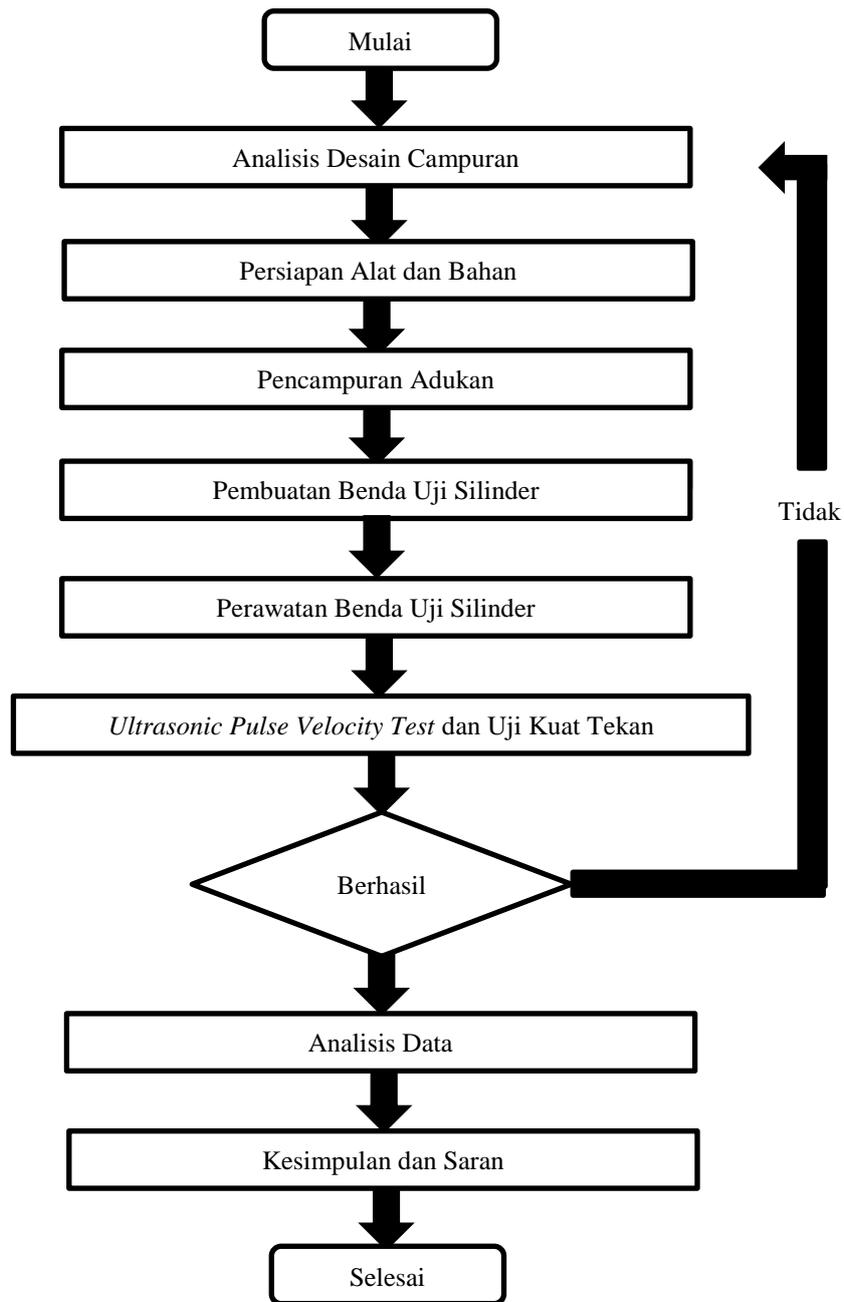
Gambar 2. Metode pengambilan data dengan PUNDIT (Bungey, Milard, & Grantham, 2006)

2. PROSEDUR PENELITIAN

Metode yang digunakan adalah metode eksperimental. Yang dimaksud dengan metode eksperimental adalah dimana peneliti mencoba membuat benda uji yang akan dites untuk mengetahui nilai-nilai yang dibutuhkan seperti nilai mutu beton dan cepat rambat gelombang pada benda uji. Ukuran benda uji yang dibuat adalah silinder berukuran 10 cm x 20 cm Untuk urutan pengerjaan pada penelitian dapat dilihat pada Gambar 3. Adapun bahan-bahan yang digunakan adalah semen OPC, pasir silika dengan ukuran lolos saringan no. 30 dan 50, tepung marmer yang telah lolos saringan no. 200, *silica fume*, *superplasticizer* dan air yang merupakan air keran dari Laboratorium Teknologi Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Universitas Tarumanagara Jakarta yang dicampur dengan es batu. Dari desain campuran sesuai dengan Tabel 1 ditargetkan benda uji memiliki kuat tekan antara 50 MPa hingga 100 MPa. Perawatan benda uji dilakukan dengan perendaman di dalam kolam selama 58 hari dan *steam* selama 8 jam. Setelah perawatan selesai, maka dilakukanlah pengujian *ultrasonic pulse velocity* yang dilanjutkan dengan tes kuat tekan.

Tabel 1. Desain campuran semua benda uji dengan persentase dibandingkan dengan massa semen

Desain Campuran	I	II	III	IV
Faktor air semen	19%	18%		20%
Pasir			110%	
Tepung marmer			10%	
<i>Silica fume</i>			20%	
<i>Superplasticizer</i>	2.50%		3%	2%



Gambar 3. Diagram alir penelitian

3. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Sebelum dilakukannya pengujian tes ultrasonic pulse velocity dan kuat tekan, terlebih dahulu dikumpulkan data-data dari benda uji seperti volume benda uji dan massa benda uji yang nantinya akan digunakan untuk mencari nilai berat jenis benda uji. Terlihat pada Tabel 2 merupakan data massa, volume dan berat jenis benda uji.

Tabel 2. Volume, massa, dan volume seluruh benda uji

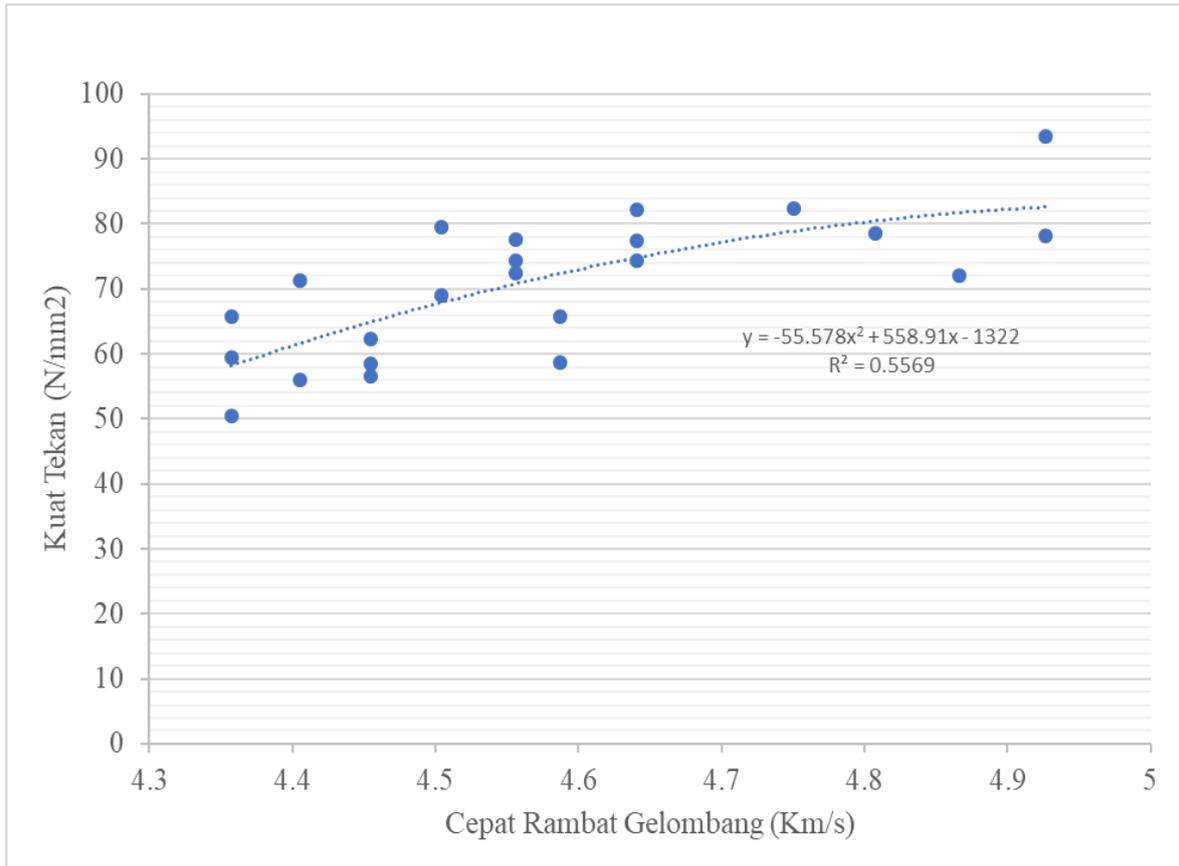
Benda Uji	Volume Benda Uji (m ³)	Massa Benda Uji (gram)	Berat Jenis (Kg/m ³)
1	0.00157	3649.5	2324.522293
2	0.00157	3404.5	2168.471338
3	0.00157	3606	2296.815287

Benda Uji	Volume Benda Uji (m ³)	Massa Benda Uji (gram)	Berat Jenis (Kg/m ³)
4	0.00157	3596.5	2290.764331
5	0.00157	3525.5	2245.541401
6	0.00157	3399	2164.968153
7	0.00157	3456.5	2201.592357
8	0.00157	3529.5	2248.089172
9	0.00157	3729	2375.159236
10	0.00157	3435.5	2188.216561
11	0.00157	3603.5	2295.22293
12	0.00157	3582	2281.528662
13	0.00157	3481.5	2217.515924
14	0.00157	3538	2253.503185
15	0.00157	3492	2224.203822
16	0.00157	3436	2188.535032
17	0.00157	3556.5	2265.286624
18	0.00157	3430.5	2185.031847
19	0.00157	3500	2229.299363
20	0.00157	3582	2281.528662
21	0.00157	3639	2317.834395
22	0.00157	3360	2140.127389
23	0.00157	3413	2173.88535

Setelah dikumpulkan data berat jenis, maka benda uji siap untuk dites UPV dan uji tekam, berikut hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 3 beserta data pencarnya pada Gambar 4.

Tabel 3. Data hasil tes UPV dan tes kuat tekan

Benda Uji	Cepat Rambat Gelombang (Km/s)	Kuat Tekan (N/mm ²)
1	4.807692308	78.55
2	4.454342984	62.37
3	4.587155963	65.73
4	4.357298475	59.44
5	4.454342984	58.51
6	4.405286344	55.99
7	4.64037123	74.4
8	4.504504505	68.91
9	4.750593824	82.32
10	4.454342984	56.49
11	4.926108374	78.2
12	4.926108374	93.38
13	4.555808656	72.5
14	4.64037123	77.38
15	4.555808656	74.27
16	4.357298475	65.79
17	4.866180049	72.13
18	4.357298475	50.5
19	4.587155963	58.7
20	4.555808656	77.56
21	4.64037123	82.23
22	4.405286344	71.23
23	4.504504505	79.54



Gambar 4. Grafik korelasi cepat rambat gelombang ultrasonik dan kuat tekan

Dalam penelitian ini nilai cepat rambat gelombang dikaitkan dengan nilai modulus elastisitas dinamis. Dengan kaitan ini, penulis mencoba mencari nilai kuat tekan beton dengan hubungan modulus elastisitas beton dengan kuat tekan. Untuk mencari nilai kuat tekan, diperlukannya nilai modulus elastisitas dinamis (E_d) dan statis (E) agar nantinya dapat diubah menjadi nilai kuat tekan, persamaan ini terdapat di dalam Persamaan 5 dan 6. Pada Tabel 4 merupakan hasil perhitungan persamaan dan kuat tekan aktual yang didapatkan dari hasil tes kuat tekan

Tabel 4. Nilai kuat tekan berdasarkan kuat tekan teori dan perbandingannya dengan hasil praktikum

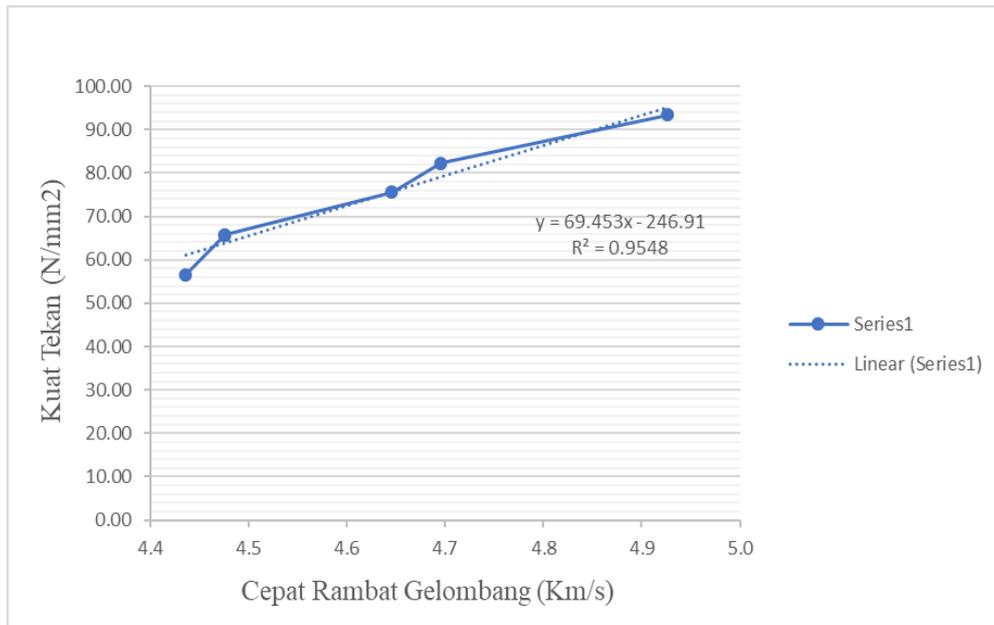
Benda Uji	Cepat Rambat Gelombang (Km/s)	Berat Jenis (Kg/m^3)	Modulus Elastisitas Dinamis (N/mm^2)	Kuat tekan teori (N/mm^2)	Kuat Tekan Aktual (N/mm^2)
1	4.807692308	2324.522	50884.323	80.75	78.55
2	4.454342984	2168.471	40747.217	51.78	62.37
3	4.587155963	2296.815	45770.962	65.33	65.73
4	4.357298475	2290.764	41190.019	52.91	59.44
5	4.454342984	2245.541	42195.422	55.53	58.51
6	4.405286344	2164.968	39790.258	49.38	55.99
7	4.64037123	2201.592	44897.206	62.86	74.4
8	4.504504505	2248.089	43200.079	58.20	68.91
9	4.750593824	2375.159	50765.128	80.37	82.32
10	4.454342984	2188.217	41118.244	52.73	56.49
11	4.926108374	2295.223	52748.456	86.77	78.2
12	4.926108374	2281.529	52433.737	85.74	93.38
13	4.555808656	2217.516	43588.774	59.25	72.5
14	4.64037123	2253.503	45955.827	65.86	77.38
15	4.555808656	2224.204	43720.235	59.61	74.27
16	4.357298475	2188.535	39351.843	48.29	65.79

Benda Uji	Cepat Rambat Gelombang (Km/s)	Berat Jenis (Kg/m ³)	Modulus Elastisitas Dinamis (N/mm ²)	Kuat tekan teori (N/mm ²)	Kuat Tekan Aktual (N/mm ²)
17	4.866180049	2265.287	50801.491	80.48	72.13
18	4.357298475	2185.032	39288.853	48.14	50.5
19	4.587155963	2229.299	44425.504	61.55	58.7
20	4.555808656	2281.529	44847.045	62.72	77.56
21	4.64037123	2317.834	47267.737	69.68	82.23
22	4.405286344	2140.127	39333.706	48.25	71.23
23	4.504504505	2173.885	41774.152	54.42	79.54

Pada Tabel 5 dan Gambar 5 terlihat jika kuat tekan diurutkan dari kuat tekan terkecil hingga paling tinggi, nilai rata-rata cepat rambat gelombangnya semakin tinggi juga. Hasil ini membuktikan bahwa semakin tinggi nilai kuat tekan maka semakin cepat juga nilai cepat rambat gelombangnya.

Tabel 5. Nilai kuat tekan berdasarkan variannya beserta cepat rambat gelombang

Cepat Rambat Gelombang (Km/s)	Massa Benda Uji (gram)	Kuat Tekan Aktual (N/mm ²)	Rata-Rata Kuat Tekan Aktual (N/mm ²)	Rata-Rata Massa Benda Uji (gram)	Rata-Rata Cepat Rambat Gelombang (Km/s)	Kualitas Beton
4.3572985	3430.5	50.5	56.6	3481.2	4.4	Bagus
4.4052863	3399	55.99				
4.454343	3435.5	56.49				
4.454343	3525.5	58.51				
4.587156	3500	58.7				
4.3572985	3596.5	59.44	65.7	3494.0	4.5	Bagus
4.454343	3404.5	62.37				
4.587156	3606	65.73				
4.3572985	3436	65.79				
4.5045045	3529.5	68.91				
4.4052863	3360	71.23	75.6	3513.3	4.6	Sangat Bagus
4.86618	3556.5	72.13				
4.5558087	3481.5	72.5				
4.5558087	3492	74.27				
4.6403712	3456.5	74.4				
4.6403712	3538	77.38	82.3	3684.0	4.7	Sangat Bagus
4.5558087	3582	77.56				
4.9261084	3603.5	78.2				
4.8076923	3649.5	78.55				
4.5045045	3413	79.54				
4.6403712	3639	82.23	93.4	3582.0	4.9	Sangat Bagus
4.7505938	3729	82.32				
4.9261084	3582	93.38				



Gambar 5. Grafik rata-rata cepat rambat gelombang ultrasonik dan mutu beton

Dari hasil regresi maka didapatkanlah formula berupa $f'c = -55.578V^2 + 558.91V - 1322$. Dari formula yang ada maka diperhitungkanlah nilai $f'c$ regresi dengan menggunakan formula yang didapatkan. Pada Tabel 6 merupakan hasil perhitungan dari formula regresi beserta selisih perbedaannya dengan nilai kuat tekan aktual

Tabel 6. Selisih nilai kuat tekan regresi dan aktual

Benda Uji	Cepat Rambat Gelombang (Km/s)	Kuat tekan Regresi (N/mm ²)	Kuat Tekan Aktual (N/mm ²)	Selisih (%)
1	4.8076923	80.44	78.55	2.41
2	4.454343	64.84	62.37	3.97
3	4.587156	72.34	65.73	10.05
4	4.3572985	58.13	59.44	2.20
5	4.454343	64.84	58.51	10.83
6	4.4052863	61.58	55.99	9.99
7	4.6403712	74.79	74.4	0.52
8	4.5045045	67.90	68.91	1.46
9	4.7505938	78.86	82.32	4.20
10	4.454343	64.84	56.49	14.79
11	4.9261084	82.57	78.2	5.58
12	4.9261084	82.57	93.38	11.58
13	4.5558087	70.74	72.5	2.42
14	4.6403712	74.79	77.38	3.35
15	4.5558087	70.74	74.27	4.75
16	4.3572985	58.13	65.79	11.64
17	4.86618	81.69	72.13	13.25
18	4.3572985	58.13	50.5	15.11
19	4.587156	72.34	58.7	23.23
20	4.5558087	70.74	77.56	8.79
21	4.6403712	74.79	82.23	9.05
22	4.4052863	61.58	71.23	13.55
23	4.5045045	67.90	79.54	14.63

4. KESIMPULAN

Berdasarkan dari hasil pengujian di laboratorium dan analisis data, maka didapatkan kesimpulan antara lain:

- Semakin tinggi kuat tekan maka nilai cepat rambat gelombang cenderung semakin tinggi, terlihat pada Tabel 5.
- Semakin berat massa benda uji, nilai cepat rambat gelombang dan kuat tekan cenderung semakin tinggi.
- Dari hasil korelasi antara cepat rambat gelombang dengan mutu beton, didapatkanlah formula kuat tekan dengan nilai R^2 sebesar 0.5569

$$f'c = -55.578V^2 + 558.91V - 1322$$

Formula ini hanya bisa digunakan pada beton tanpa agregat dengan bahan yang kurang lebih sama.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (2012). *Metode Uji Kecepatan Rambat Gelombang Melalui Beton (ASTM C 597 – 02, IDT)*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Bungey, J. H., Milard, S. G., & Grantham, M. G. (2006). *Testing of Concrete in Structures, 4th Edition*. United States of America: Taylor & Francis.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2005). *Fundamentals of Physics*. United States of America: John Wiley & Sons Inc.
- International Atomic Energy Agency. (2002). *Guidebook on Non-Destructive Testing of Concrete Structures*. Austria: International Atomic Energy Agency.
- Lydon, & Balendran. (1986). *Some Observations on Elastic Properties of Plain Concrete*. Cement and Concrete Research.
- Malhotra, V. M. (2004). *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, Second Edition*. CRC Press.
- Naibaho, P. R. (2013). "Perilaku Hubungan Balok-Kolom Eksterior Beton Normal, Mutu Tinggi, & Bubuk Reaktif Dengan Beban Lateral Siklik (104S)". *Konferensi Nasional Teknik Sipil 7 (KONTEKS 7) Universitas Sebelas Maret (UNS)*. Surakarta, 24-26 Oktober 2013, 115-122
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete, 5th Edition*. Malaysia: Pearson.