

Analisa Mutu Beton Pengecoran Kolom dengan Metode *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)

Thesalonika Octaviana Wahyudi *¹
Herawati Toding Rongko ²
Minarni Nur Trilita ³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran”
Jawa Timur

*e-mail: 21035010089@student.upnjatim.ac.id , 21035010015@student.upnjatim.ac.id ,
minarni.ts@upnjatim.ac.id

Abstrak

SDGs memiliki tujuan pembangunan berkelanjutan. Pembangunan tower dan gedung bertingkat tinggi menjadi salah satu pilihan untuk tempat hunian dan fasilitas publik dengan lahan yang tidak cukup luas. Pembangunan tower dan gedung bertingkat tinggi perlu melewati uji standar yang berlaku salah satunya aspek pengujian beton. Pengujian pada mutu beton perlu dilakukan untuk melihat hasil pengecoran dari mix desain. Ada beberapa metode pengujian beton. Pengujian tanpa merusak beton yaitu non-destruktif tes, lalu pengujian yang merusak beton yaitu destruktif tes, dan pengujian yang setengah merusak beton disebut semi destruktif tes. Penelitian ini membahas mengenai salah satu metode pengujian non-destruktif tes yaitu *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV). Penelitian ini dilakukan untuk memberikan analisa mengenai pengujian UPV untuk dapat menjadi bahan eksplorasi mengenai pengujian mutu beton menggunakan UPV. Pengujian menggunakan lima sampel benda uji kolom pada gedung bertingkat tinggi dengan mutu rencana 40 Mpa. Hasil pulse velocity dikorelasikan terhadap mutu beton sesuai dengan rumus berdasarkan ASTM C597-09 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Didapatkan hasil dari pengujian UPV bahwa mutu beton pada sampel kolom sebuah bangunan gedung tinggi memenuhi mutu rencana.

Kata kunci: *Ultrasonic Pulse Velocity, Mutu Beton, SDGs*

Abstract

SDGs have the goal of sustainable development. The construction of towers and high-rise buildings has become one of the choices for residential and public facilities in areas with limited land. The construction of towers and high-rise buildings must pass the applicable standard tests, one of which is concrete testing. Concrete quality testing is necessary to evaluate the results of casting based on the mix design. There are several methods of concrete testing. The non-destructive test, which does not damage the concrete, is called non-destructive testing, while the destructive test, which damages the concrete, is called destructive testing, and the semi-destructive test, which partially damages the concrete, is called semi-destructive testing. This research discusses one of the non-destructive testing methods, namely *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV). This study was conducted to provide an analysis of UPV testing as an exploration of concrete quality testing using UPV. The testing used five column test samples from a high-rise building with a planned strength of 40 MPa. The pulse velocity results were correlated with concrete quality according to the formula based on ASTM C597-09 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. The results of the UPV testing showed that the concrete quality of the column samples from the high-rise building met the planned strength.

Keywords: *Ultrasonic Pulse Velocity, Concrete Quality, SDGs*

PENDAHULUAN

Pertumbuhan penduduk yang pesat menjadikan pemerataan pembangunan juga harus dituntut sejalan. Tower atau bangunan gedung tinggi menjadi pilihan bagi beberapa daerah yang membutuhkan ruang hunian ataupun fasilitas publik dan pemerintahan tanpa harus memakai lahan yang luas. Pembangunan tower dan gedung tinggi merupakan salah satu upaya pemerintah dan masyarakat luas dalam sejalan dengan visi pembangunan berkelanjutan demi kehidupan masyarakat yang semakin baik. *Project global Sustainable Development Goals* (SDGs) yang dijalankan oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) atau *United Nations* (UN) mengerakan berbagai negara dalam pembangunan berkelanjutan ini demi kehidupan upaya kehidupan yang lebih layak bagi masyarakat.

Pembangunan pada gedung tinggi tidak dapat dipisahkan dengan berbagai standar mutu yang dipakai untuk membangun gedung yang aman dan nyaman bagi penghuni, pengguna, dan bangunan lain disekitar gedung tersebut. Pengujian mutu beton merupakan salah satu pengujian yang perlu dilakukan pada proyek konstruksi untuk memastikan pembangunan tower atau gedung tinggi tersebut masuk dalam standar dan peraturan yang telah ada.

Pengujian pada struktur beton setelah beton mengeras sangat penting untuk memastikan bahwa struktur sesuai dengan desain yang telah direncanakan. Berbagai jenis pengujian dapat dilakukan, antara lain pengujian yang tidak merusak atau NDT (Non Destructive Test), setengah merusak atau SDT (Semi Destructive Test), dan merusak atau DT (Destructive Test). Destructive Test adalah metode yang paling mendekati nilai kuat tekan beton sebenarnya, dan dilakukan di laboratorium menggunakan alat penguji kuat tekan (compression testing machine). Namun, dalam beberapa kasus, jika tidak memungkinkan untuk mengambil sampel beton di laboratorium atau diperlukan pembacaan langsung terhadap kuat tekan beton di lapangan, pengujian tidak merusak (NDT) menjadi pilihan. NDT adalah metode pemeriksaan atau evaluasi material atau komponen tanpa merusaknya (J. Helal et al., 2015). Beberapa metode NDT yang digunakan antara lain Magnetic Particle Testing (MT), Liquid Penetrant Testing (PT), Eddy Current Testing (ET), Radiographic Testing (RT), dan Ultrasonic Testing (UT) (Mochammad Amir Syarifuddin & Ali Akbar, 2024). Setiap metode NDT memiliki kelebihan dan kekurangan tergantung pada jenis, lokasi, dan ukuran cacat pada material atau komponen yang diuji. Oleh karena itu, pemahaman dan keterampilan yang baik dalam memilih metode yang tepat sangat diperlukan untuk menghasilkan hasil pengujian yang optimal. Dalam situasi di mana pengambilan sampel pada material atau bangunan yang sudah selesai tidak memungkinkan, NDT menjadi metode pengujian yang tepat. Beberapa alasan penggunaan NDT antara lain adalah:

- a. Hasil pengujian kubus atau silinder yang tidak memenuhi standar kuat tekan beton sesuai dengan desain yang direncanakan, sehingga diperlukan pengujian ulang untuk mengetahui kuat tekan aktual yang terpasang.
- b. Tidak adanya pembuatan benda uji kubus atau silinder karena kelalaian atau tidak adanya kesepakatan terkait pembuatan benda uji tersebut.
- c. Sebagai bahan untuk evaluasi ulang terhadap bangunan eksisting (bangunan yang sudah ada). Hal ini dilakukan jika ada kemungkinan perubahan kualitas struktur yang disebabkan oleh kecelakaan atau kejadian lainnya.
- d. Evaluasi juga dilakukan apabila terjadi perubahan fungsi bangunan atau penambahan beban yang dapat mempengaruhi kapasitas, yang nantinya akan menghasilkan rekomendasi untuk memperkuat struktur eksisting.
- e. Kerusakan yang terjadi akibat kesalahan konstruksi, ketidaksesuaian dengan desain rencana, atau faktor usia bangunan. Dari hasil evaluasi ini, akan diperkirakan kapasitas struktur dan apakah perlu dilakukan perbaikan.
- f. Sebagai bahan evaluasi untuk beton yang dihasilkan melalui proses fabrikasi atau beton pracetak yang akan digunakan dalam suatu struktur bangunan.

Pada saat ini kita menggunakan metode pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) atau bisa diklasifikasikan kedalam metode *Ultrasonic Testing*. UPV saat ini beberapa kali sudah sering dipakai pada pengujian untuk *quality control* bangunan ekisting. Pengujian beton menggunakan UPV ini merupakan salah satu pengujian yang lebih banyak digunakan secara luas dikarenakan hasil yang memuaskan dengan menggunakan gelombang ultrasonik dan memerlukan biaya yang terbilang rendah dari pada metode pengujian yang lain, hasil yang didapatkan dapat melihat agregat yang tertanam pada beton. Informasi yang didapatkan dari pengujian UPV ini adalah sinyal lokasi retakan, ukuran cacat (Defect), dan beberapa informasi lain dapat didapatkan dari hasil pengujian metode ini (S. Gholizadeh, 2016). Pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan kolom bangunan ekisting untuk dapat diuji dengan metode UPV. Dari hasil penelitian ini digunakan untuk menentukan kualitas terjadi atau tidak nya cacat (Defect) pada kolom tersebut sehingga dapat meningkatkan penerapan metode NDT pada suatu proyek konstruksi jika *Destructive Test* (DT) tidak dapat dilakukan. Sehingga mudah dilakukan pengujian untuk mengetahui kualitas struktur suatu bangunan. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan eksplorasi untuk dapat dikembangkan dan diaplikasikan pada proyek konstruksi yang lebih luas.

METODE

Gambar 1. Flowchart Metode Penulisan

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan tujuan mengevaluasi kualitas beton menggunakan pengujian non-destruktif dengan alat UPV, serta untuk menganalisis hubungan antara kecepatan gelombang ultrasonik dengan mutu beton. Penelitian ini menggunakan metode pengumpulan data primer dan sekunder selama periode magang berlangsung pada salah satu lokasi proyek pembangunan rumah sakit tempat penelitian ini dilaksanakan.

HASIL DAN PEMBAHASAN**Kolom**

Kolom adalah elemen struktur yang berfungsi untuk menyalurkan beban dari struktur di atasnya. Kolom dapat terbuat dari berbagai bahan, termasuk beton bertulang, baja, atau batu bata, tergantung pada kebutuhan desain dan jenis bangunan yang dibangun (Ramli, 2015). Fungsi kolom sendiri sebagai berikut :

- Penompang beban vertikal yang diberikan oleh elemen struktur di atasnya. Beban ini berupa beban mati, beban hidup, serta beban dinamis.
- Menjaga kestabilan bangunan secara keseluruhan yang dirancang dengan baik untuk membantu memastikan bangunan tetap tegak dan stabil meskipun menerima beban yang cukup besar.
- Pengalihan beban ke pondasi kemudian mendistribusikan beban ke tanah atau struktur pendukung lainnya.
- Membentuk struktur vertikal bangunan. Kolom menentukan tinggi lantai dan jarak antar lantai serta menjadi elemen penentu dalam desain arsitek bangunan.

Kolom memiliki peran penting dalam konstruksi bangunan. Tanpa kolom yang kuat dan tepat desainnya, bangunan tidak akan mampu menahan beban dengan aman, yang bisa berakibat fatal bagi keselamatan penghuninya.

Mutu Beton

Beton memiliki berbagai tingkat mutu yang ditentukan oleh proporsi bahan-bahan penyusunnya, seperti semen, agregat, dan air. Mutu beton diukur berdasarkan kuat tekan beton yang dihasilkan yaitu kemampuan beton menahan tekanan sebelum terjadi kerusakan. Pengujian kuat tekan beton dilakukan menggunakan sampel berbentuk silinder atau kubus yang diuji di laboratorium menggunakan mesin uji tekan. Beberapa faktor mempengaruhi mutu beton antara lain :

- Perbandingan Bahan dengan rasion yang tidak sesuai, antara semen, agregat, dan air. Rasio air semen yang lebih rendah cenderung menghasilkan beton yang lebih kuat.

- b. Jenis semen yang digunakan dalam campuran beton mempengaruhi proses hidrasi dan kekuatan beton. Pemilihan kualitas dan type semen juga perlu diperhatikan dalam pembuatan mix design beton.
- c. Kualitas agregat yang digunakan dalam beton harus memenuhi standar tertentu untuk memastikan beton harus memenuhi standar tertentu untuk memastikan beton memiliki kualitas yang baik.
- d. Proses pencampuran yang tidak merata juga mengurangi mutu beton.
- e. Pemadatan yang tidak baik dapat mengandung udara yang terperangkap didalam beton juga dapat memengaruhi kekuatan dan daya tahan beton.
- f. Perawatan beton setelah pengecoran, seperti menjaga kelembapan dan suhu juga dapat memengaruhi perkembangan kekuatan beton (Pitchiah Raman Shunmuga Vembu & Arun Kumar Ammasi, 2023).

Metode Pengujian Mutu Beton

Mutu beton yang baik sangat penting dalam menjamin kekuatan dan keselamatan struktur bangunan. Beton yang memiliki mutu tinggi akan lebih tahan terhadap beban, cuaca ekstrem, dan faktor-faktor lain yang dapat merusak struktur seiring waktu. Oleh karena itu, dalam setiap proyek konstruksi, pemilihan material yang tepat dan pengujian mutu beton harus dilakukan dengan cermat untuk memastikan kualitas dan ketahanan bangunan (Ken W.Day, 1995). Pengujian mutu beton dilakukan dengan berbagai cara, antara lain:

- a. Pengujian kuat tekan dilakukan dengan menggunakan mesin uji tekan pada sampel beton berbentuk silinder atau kubus.
- b. Pengujian Non-Destruktif (NDT) digunakan untuk memeriksa kualitas beton tanpa merusaknya, seperti kekerasan dengan metode ultrasonik atau uji rebound hammer.
- c. Pengujian kualitas agregat diuji untuk memastikan kualitasnya, seperti kekerasan dan kandungan lumpur yang terkandung.

Ultrasonic Pulse Velocity

Penerapan ultrasonik untuk pengujian non-destruktif tes pertama kali dilakukan oleh penemu efek piezoelektrik dua bersaudara Pierre dan Jacques Curie pada tahun 1880. Baru pada perang Dunia II saat teknologi yang diperlukan telah tersedia, Firestone dari Amerika Serikat dan Sproule dari Inggris mengembangkan ultrasonik untuk detektor cacat gema ultrasonik (J.Blitz & G. Simpson, 1996).

Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) merupakan metode non-desktruktif yang digunakan untuk mengukur kecepatan gelombang ultrasonik yang merambat melalui material. Prinsip dari metode ini adalah mengirimkan pulsa ultrasonik melalui material dan pengukuran waktu yang dibutuhkan gelombang untuk mengetahui jarak tertentu. Kecepatan gelombang ultrasonik ini dipengaruhi oleh densitas dan modulus elastisitas material sehingga dapat memperkirakan kualitas dan kekuatan beton. UPV banyak digunakan dalam berbagai bidang ,khususnya dalam bidang kontruksi(R.Martin Simatupang et al., 2016).

Metode Pengukuran *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)

Metode pengujian UPV dilakukan dengan menggunakan alat PUNDIT, yang dikembangkan berdasarkan prinsip kecepatan gelombang yang melintasi media padat, yang dipengaruhi oleh sifat elastik dari media tersebut. Ketika digunakan dengan benar, alat PUNDIT dapat memberikan informasi yang mendalam mengenai nilai kuat tekan beton, dengan syarat hubungan antara sifat elastik suatu benda padat dan nilai kuat tekannya telah diketahui.

Sinyal getaran longitudinal dihasilkan oleh transduser elektroakustik yang kontak langsung dengan permukaan beton yang diuji. Sinyal ini kemudian ditransmisikan melalui beton dengan bantuan cairan penghubung seperti minyak atau pasta selulosa, yang menyebabkan beton mengalami refleksi gelombang dari berbagai material di dalamnya. Proses ini melibatkan pengembangan gelombang tegangan, termasuk gelombang longitudinal dan gelombang geser, yang merambat melalui

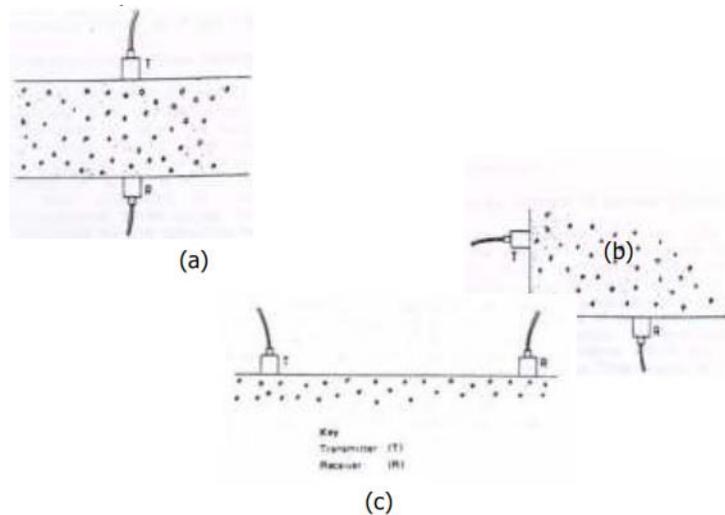
beton. Gelombang pertama yang diterima oleh transduser penerima adalah gelombang longitudinal, yang kemudian dikonversi menjadi sinyal elektrik oleh transduser kedua.

Tabel 1. Klasifikasi kualitas beton berdasarkan kecepatan gelombang

	Pulse Velocity (m/s)	Concrete conditions
Concrete Quality	> 4500	Excellent
	3500 - 4500	Good
	3000 – 3500	Medium
	< 3000	Doubtful

Pengujian UPV PUNDIT dilakukan mengacu pada BS 1881: Part 203: 1986 dan ASTM C597-97. Dalam standar ini dijelaskan bahwa transduser penerima mendeteksi kedatangan pulsa komponen yang datang lebih awal. Pengukuran kecepatan pulsa ultrasonik dilakukan dengan tiga metode, antara lain:

- a. *Direct transmission*
- b. *Semi-direct transmission*
- c. *Indirect/surface transmission*



Gambar 2. Metode Pengambilan *Pulse Velocity* (a) *Direct Trasmision*, (b) *Semi-direct Transmission*, (c) *Indirect/Surface Transmission*

Penulis menggunakan data dari sampel kolom dari proyek pembangunan rumah sakit tempat penelitian ini dilaksanakan berjumlah 5 sampel kolom. Benda uji yang dipakai adalah kolom dengan perencanaan mutu beton 40 Mpa dengan dimensi kolom yang berbeda-beda. Ada berbagai macam faktor yang dapat mempengaruhi hasil uji dari metode NDT yang digunakan, sehingga penting untuk membandingkan hasil uji antara kuat tekan beton dengan metode NDT.

Metode Pengukuran Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

Metode pelaksanaan UPV PUNDIT dibagi menjadi 3 tahap pelaksanaan yaitu :

1. **Persiapan Lokasi Uji**
 Tahap persiapan dimulai dengan menentukan dan mempersiapkan lokasi titik uji. Pemilihan lokasi uji didasarkan pada kondisi beton dengan permukaan yang relatif baik. Setelah titik uji ditentukan, langkah selanjutnya adalah meratakan permukaan titik uji (*flattening*) menggunakan gerinda, kemudian menandai lokasi titik uji dengan pilox atau spidol.
2. **Persiapan Alat**
 Tahap ini dimulai dengan menyetel alat *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) PUNDIT sesuai dengan kebutuhan pengukuran. Selanjutnya, alat dikalibrasi mengikuti prosedur yang berlaku dengan menggunakan benda uji kalibrasi. Sebelum kalibrasi dilakukan, permukaan benda uji dioleskan dengan gel ultrasonik untuk memastikan transmisi gelombang ultrasonik yang optimal dan

mengurangi hambatan pada kontak antara alat dan benda uji. Alat pendukung dalam pengujian ultrasonic pulse velocity (UPV) meliputi:

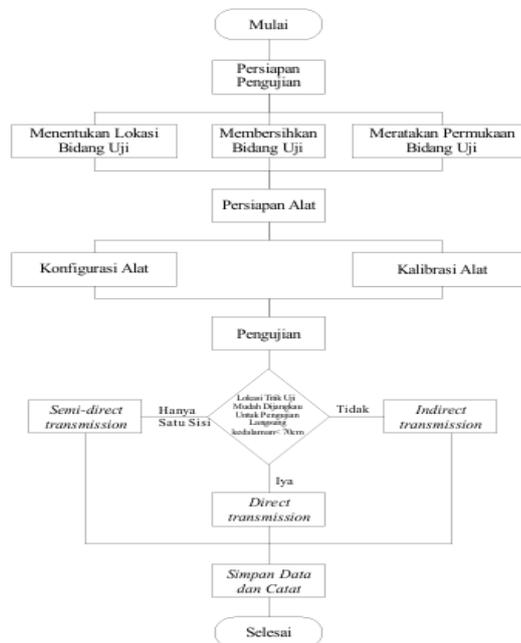
1. UPV Pundit Lab + Versi Digital
2. Gurinda
3. Media Kalibrasi
4. *Ultrasonic Gel atau Grease*
5. Meteran atau Penggaris
6. Sikat Kawat
7. Spidol atau *pilox*



Gambar 3. Gambar Alat UPV Pundit Versi Digital

3. Pengujian

Proses pengujian dimulai dengan pengukuran pulse velocity menggunakan alat PUNDIT. Berdasarkan standar yang diterapkan, terdapat tiga metode dalam pengambilan pulse velocity. Metode direct transmission sangat disarankan karena memberikan hasil yang paling tepat, meskipun penerapannya di lapangan terbatas. Metode semi-direct juga memberikan hasil yang cukup akurat. Di sisi lain, metode indirect atau surface transmission menghasilkan hasil yang paling tidak akurat jika dibandingkan dengan metode lainnya, namun diperlukan reduksi untuk mendekati hasilnya dengan nilai pulse velocity dari direct transmission. Berikut adalah Flowchart Pelaksanaan UPV Pundit Test:



Gambar 4. Alur Pengujian UPV

Output Pembacaan Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity dilakukan secara langsung di lapangan pada sampel kolom yang akan diuji. Pengujian ini dilakukan setelah bekisting dilepas atau sekitar 12 hingga 14 jam setelah

pengecoran kolom. Pemeriksaan dilakukan berdasarkan nilai yang diperoleh dari alat PUNDIT. Hasil tersebut kemudian diolah untuk menghasilkan output. Output dari pembacaan UPV digunakan untuk menentukan kriteria dan perkiraan korelasi mutu beton berdasarkan kerapatannya. Berikut adalah hasil pembacaan pulse velocity beserta kriterianya:

Tabel 2. Output Pembacaan UPV

NO	Element Structure	ID	Velocity (m/s)	Average Direct Velocity	>4500 m/s Excelent	3500-4500 m/s Good	3000-3500 m/s Medium	<3000 m/s Doubtfull	Description
1	Kolom	A	4072	4009,2 m/s	-	√	-	-	Good Concrete Category
		B	3835						
		C	3911						
		D	4113						
		E	4115						
2	Kolom	A	3835	4016,8 m/s	-	√	-	-	Good Concrete Category
		B	3970						
		C	3831						
		D	4317						
		E	4031						
3	Kolom	A	3974	3921,0 m/s	-	√	-	-	Good Concrete Category
		B	4057						
		C	3810						
		D	3707						
		E	4057						
4	Kolom	A	3926	3962,2 m/s	-	√	-	-	Good Concrete Category
		B	4002						
		C	3950						
		D	4081						
		E	3852						
5	Kolom	A	4031	4037,8 m/s	-	√	-	-	Good Concrete Category
		B	4061						
		C	4063						
		D	3991						
		E	4043						

Based On BS 1881 : Part 203 : 1986

Hasil pembacaan UPV kemudian akan disimpulkan kriteria dan nilai pulse velocity tiap elemen struktur. Hasil *pulse velocity* akan dikorelasikan terhadap mutu beton sesuai dengan rumus berdasarkan ASTM C597-09 *Standar Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*

$$V = \sqrt{\frac{E(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \times \text{data empiris} \dots (01 *)$$

Dimana :

E = *Dynamic modulus of elasticity*

μ = *Dynamic poisson's ratio*

ρ = *Density*

Dari hasil korelasi pembacaan UPV dengan mutu beton didapatkan hasil sebagai berikut :

Tabel 3. Hasil Korelasi Pembacaan UPV dengan rumus berdasarkan ASTM C597-09 *Standar Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*

NO	Element Structure	ID	Velocity (m/s)	Poisson Ratio*	Density (Kg/m ³)	Data Empiris	Ec(Mpa)**	Fc' Mpa***	Average Fc'
1	Kolom	A	4072	0,15	2400	0,843	31763	45,67	43,65 Mpa 525,90 Kg/cm ²
		B	3835	0,15	2400	0,867	28966	37,98	
		C	3911	0,15	2400	0,859	29861	40,37	
		D	4113	0,15	2400	0,839	32249	47,08	
		E	4115	0,15	2400	0,839	32272	47,15	
2	Kolom	A	3835	0,15	2400	0,867	28966	37,98	43,9 Mpa 529,98 Kg/cm ²
		B	3970	0,15	2400	0,853	30558	42,27	
		C	3831	0,15	2400	0,857	30097	41,01	
		D	4317	0,15	2400	0,818	34663	54,39	
		E	4031	0,15	2400	0,847	31279	44,29	
3	Kolom	A	3974	0,15	2400	0,853	30605	42,4	40,82 Mpa 419,79 Kg/cm ²
		B	4057	0,15	2400	0,844	31586	45,16	
		C	3810	0,15	2400	0,869	28672	37,22	
		D	3707	0,15	2400	0,879	27464	34,15	
		E	4057	0,15	2400	0,844	31586	45,16	
4	Kolom	A	3926	0,15	2400	0,857	30038	40,85	42,06 Mpa 506 69 Kg/cm ²
		B	4002	0,15	2400	0,85	30936	43,32	
		C	3950	0,15	2400	0,855	30321	41,62	
		D	4081	0,15	2400	0,842	31870	45,98	
		E	3852	0,15	2400	0,865	29166	38,51	
5	Kolom	A	4031	0,15	2400	0,847	31279	44,29	44,52 Mpa 536,4 Kg/cm ²
		B	4061	0,15	2400	0,844	31633	45,3	
		C	4063	0,15	2400	0,844	31657	45,37	
		D	3991	0,15	2400	0,851	30806	42,96	
		E	4043	0,15	2400	0,846	31420	44,69	

KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini yaitu hasil pengecoran pada kolom sesuai dengan rencana mutu yaitu 40 Mpa. Mutu pada hasil pengecoran kolom dapat terpengaruh dengan masih adanya ruang udara di dalam beton cor dikarenakan tidak maksimalnya penggunaan vibrator saat pengecoran berlangsung. Hal tersebut dapat diperhatikan saat pekerjaan pengecoran berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- J. Helal, M. Sofi, & P. Mendis. (2015). Non-Destructive Testing of Concrete: A Review of Methods . *Electronic Journal of Structural Engineering*, 14(1), 97–105.
- J.Blitz, & G. Simpson. (1996). *Ultrasonic Methods of Non-Destructive Testing*. Champman And Hall.
- Ken W.Day. (1995). *Concrete Mix Design, Quality Control and Specification* (Taylor & Francis, Eds.; 3rd ed.). E & FN Spon.

-
- Mochammad Amir Syarifuddin, & Ali Akbar. (2024). Analisa Cacat Las Pipa Pembakaran Boiler dengan Metode PAUT (Phased Array Ultrasonic Testing). *Innovative Technological: Methodical Research Journal*, 3(1), 1–7.
- Pitchiah Raman Shunmuga Vembu, & Arun Kumar Ammasi. (2023). A Comprehensive Review on the Factors Affecting BondStrength in Concrete. *Buildings*, 13(577), 1–27.
- Ramli, H. (2015). *Struktur Beton Bertulang untuk Bangunan Gedung*. Penerbit Alfabeta.
- R.Martin Simatupang, Devi Nuralinah, & Christin Remayanti. (2016). Korelasi Nilai Kuat Tekan Beton Antara Hammer Test, Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) dan Compression Test. *Rekayasa Sipil*, 10(1), 26–32.
- S. Gholizadeh. (2016). A review of non-destructive testing methods of composite materials. *Procedia Structural Integrity*, 1, 50–57.