



Studi Pengujian Tidak Merusak Ultrasonik pada Frekuensi 50 kHz untuk Modulus Elastisitas, Porositas, dan Kekuatan Tekan Beton

Riska Rachmantyo^{1}, Muhammad Sefano Nur Aziiz²*

^{1*} Kelompok Keahlian Ilmu dan Teknik Material, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

² Program Studi Sarjana Teknik Material, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia.

*Corresponding author: rachmantyo.riska@office.itb.ac.id

Received: 29/May/2023
Accepted: 31/August/2023

Revised: 31/August/2023
Published: 31/August/2023

To cite this article:

Rachmantyo, R, & Nur Aziiz, M. S. (2023). Studi Pengujian Tidak Merusak Ultrasonik pada Frekuensi 50 kHz untuk Modulus Elastisitas, Porositas, dan Kekuatan Tekan Beton. *SPECTA Journal of Technology*, 7(2), 606 - 615. [10.35718/specta.v7i2.869](https://doi.org/10.35718/specta.v7i2.869)

Abstract

Important properties of structural materials, especially ceramics and concrete, are modulus of elasticity, porosity, and compressive strength. In the case of concrete, the modulus of elasticity of each material varies widely. The porosity created during the manufacturing process cannot be separated from the elastic modulus. Specimen testing methods typically involve compression testing, but only know the mechanical properties, not the porosity. The porosity of concrete materials can be measured using the non-destructive ultrasonic testing method. The modulus of elasticity to compressive strength can be measured from the resulting porosity value. Besides porosity, concrete properties are also affected by the water/cement ratio or w/c composition. Data from existing research results, which have certain limitations, were used in this research. The modulus of elasticity and compressive strength were calculated from the data of 39 ultrasonic tests of concrete samples with water/cement ratio variations ranging from 0.27 to 0.9 at a frequency of 50 kHz. Porosity ranged from 2.210% to 16.324% in the test results. According to the calculation, the average modulus of elasticity is 16.011 GPa and the average compressive strength is 13.36 MPa. As a result, porosity rises, reducing modulus of elasticity and compressive strength.

Keywords: Concrete, Compressive strength, Modulus of elasticity, Porosity, Ultrasonic non-destructive test.

Abstrak

Modulus elastisitas, porositas dan kekuatan tekan merupakan sifat penting dari material struktural khususnya keramik maupun beton. Pada beton, modulus elastisitas dari setiap material sangat bervariasi. Hal tersebut tidak lepas dari porositas yang terbentuk saat proses pembuatan. Metode pengujian sampel pada umumnya menggunakan uji tekan, namun hanya tahu sifat mekanik saja tanpa berapa besar porositasnya. Metode uji tidak merusak tipe ultrasonik dapat digunakan untuk mengukur porositas pada material beton. Dari nilai porositas yang dihasilkan dapat untuk mengukur modulus elastisitas hingga kekuatan tekan. Selain porositas, sifat beton juga dipengaruhi oleh komposisi rasio air dan semen atau w/c. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan data dari hasil penelitian yang telah ada yang memiliki batasan tertentu. Perhitungan nilai modulus elastisitas dan kekuatan tekan dari 39 data uji ultrasonik sampel beton dengan variasi w/c antara 0,27 hingga 0,9 pada frekuensi 50 kHz. Hasil uji menunjukkan besar porositas sebesar 2,210% hingga 16,324%. Perhitungan yang diperoleh modulus elastisitas rata-rata adalah 16,011 GPa dan kekuatan tekan rata-rata adalah 13,36 MPa.

Komposisi rasio w/c semakin besar maka persen porositas akan meningkat sehingga modulus elastisitas dan kekuatan tekannya menurun.

Kata Kunci: Beton, Kekuatan tekan, Modulus elastisitas, Porositas, Uji tidak merusak ultrasonik.

1. Pendahuluan

Material keramik terdiri dari beberapa jenis seperti keramik berbasis lempung, keramik refraktori atau tahan api, keramik abrasif, semen, hingga keramik mutakhir (Ashby, 2019; Callister, 2018; Smith, 2019). Pengujian mekanik dari suatu material dilakukan dengan memberikan beban hingga material tersebut mengalami kegagalan atau dikategorikan dengan pengujian merusak. Kegagalan terjadi pada daerah elastis atau plastis tergantung dari jenis materialnya. Umumnya material keramik memiliki daerah elastisitas yang kecil sehingga bersifat getas, hal ini menyebabkan tidak dapat dilakukan pengujian dengan jenis pembebanan tarik. Sifat mekanik dari material keramik dapat diperoleh dengan uji tekan atau uji lentur (*bending/flexural test*) (Barsoum, 2020; Richerson, 2018). Hasil dari pengujian lentur salah satunya adalah modulus elastisitas. Modulus elastisitas merupakan salah satu sifat mekanik material yang digunakan pada aplikasi struktural sebagai parameter kekakuan material (Barsoum, 2020). Besarnya modulus elastisitas dipengaruhi oleh jenis ikatan antar atom, struktur kristal, jumlah rongga kosong (*void*) dan temperatur (Callister, 2018). Adanya rongga kosong pada material keramik terjadi karena proses pembuatannya. Hal ini sering terdapat pada jenis material keramik berbasis lempung dan beton (Mehta, 2005; Neville, 2010). Beton adalah campuran antara pasta semen (campuran air dan semen) dengan agregat dan beberapa ditambahkan *admixture*. Komposisi antara air dan semen dikenal dengan rasio w/c (*water per cement*) yang sangat berperan terhadap sifat mekaniknya (Mehta, 2005). Beton secara umum memiliki modulus elastisitas pada rentang 30 – 50 GPa (Mehta, 2005). Nilai modulus elastisitas beton bervariasi dan rentangnya lebar karena dipengaruhi oleh bahan baku (ukuran dan jenis agregat) hingga pemrosesannya yang beragam sehingga tidak terkompaksi secara padat dan akan menghasilkan banyak pori (Neville, 2012). Berbeda dengan material keramik mutakhir seperti aluminium oksida (alumina), titanium dioksida (titania), dan lain-lain yang memiliki rongga kosong jauh lebih sedikit (Heimann, 2010). Modulus elastisitas dari alumina yang memiliki fraksi volume porositas 0,1 – 0,2 dapat mencapai 240 – 300 GPa (Callister, 2018). Nilai ini jauh lebih tinggi daripada nilai modulus elastisitas beton. Adanya porositas besar pada beton maupun keramik menjadi penyebab memiliki kekuatan tarik yang lebih rendah dibandingkan dengan material logam, polimer, maupun komposit. Porositas dapat menjadi tempat terjadinya konsentrasi tegangan yang diberikan. Tegangan tidak terdistribusi merata sehingga material akan lebih mudah mengalami gagal atau patah. Namun, jenis pengujian mekanik yang telah dilakukan tidak dapat mengetahui atau menghitung seberapa besar pori yang terdapat pada material (Neville, 2012; Heimann, 2010). Oleh karena itu perlu dilakukan jenis pengujian lain yang dapat mengukur besar maupun banyaknya porositas pada suatu material.

Metode pengujian material yang dapat digunakan untuk mengetahui atau mengukur besar porositas diantaranya adalah dengan pengamatan morfologi permukaan material atau tomografi, pengujian porosimetri merkuri, pengujian radiografi, pengujian penetrasi warna, pengujian partikel magnetic, hingga pengujian ultrasonik. Metode pengujian-pengujian tersebut termasuk pada kategori pengujian tidak merusak atau *Non-destructive Test* (NDT). Untuk jenis material keramik atau beton, besarnya nilai porositas dapat diukur dengan metode uji ultrasonik (Hellier, 2003; ASM Handbook, 2018). Pengujian NDT jenis ultrasonik telah sering digunakan pada jenis material yang homogen seperti logam salah satunya untuk menguji kualitas sambungan las. Sedangkan pada beton, pengujian ultrasonik termasuk efektif untuk kontrol kualitas dan keseragaman beton maupun mendeteksi kerusakan pada komponen structural berupa estimasi kedalaman retak. Prosedur pengujian NDT ultrasonik pada aplikasi beton diatur pada standar ASTM C597 (ASTM, 2016; Naik, 2004). Pengujian ultrasonik memanfaatkan perambatan gelombang suara yang memiliki frekuensi tinggi terhadap suatu material. Konsep uji ultrasonik adalah mengukur waktu tempuh gelombang akustik dalam suatu medium dan menghubungkannya dengan sifat elastis dan densitas material. Waktu tempuh gelombang ultrasonik mencerminkan kondisi internal daerah uji. Secara umum, untuk lintasan tertentu, waktu tempuh yang lebih tinggi berkorelasi dengan beton berkualitas rendah dengan lebih banyak anomali dan kekurangan,

sementara waktu tempuh yang lebih rendah berkorelasi dengan beton berkualitas tinggi dengan lebih sedikit anomali. Setelah gelombang ultrasonik menyebar di dalam area pengujian, gelombang tersebut tercermin dalam batas anomali yang menghasilkan waktu tempuh yang lebih tinggi. Ini menghasilkan waktu transmisi yang lebih tinggi (kecepatan gelombang lebih rendah) pada beton berkualitas buruk dan waktu transmisi lebih rendah (kecepatan gelombang lebih tinggi) pada beton berkualitas baik (Jain, 2013; BS, 1999). Ada 3 jenis konfigurasi *probe* dan *transducer* yang biasa digunakan, yaitu transmisi langsung (antara probe dan transducer berada pada posisi berlawanan dan saling berhadapan), transmisi semi langsung (posisi *probe* – *transducer* membentuk sudut 90°), dan transmisi tidak langsung (berada pada permukaan yang sama dan bersebalahan). Umumnya pada pengujian ultrasonik pada beton menggunakan jenis transmisi langsung (1 transduser pengirim dan 1 transduser penerima, yang terhubung ke generator pulsa dan pencatat data). Kecepatan ultrasonik rentan terhadap lintasan perjalanan signal yang ditentukan oleh konfigurasi transduser (BS, 1999). Tujuan utama dari penelitian ini adalah mengkaji data-data hasil pengujian ultrasonik pada beton dari penelitian yang telah dilakukan untuk menentukan sifat beton berupa modulus elastisitas, kekuatan tekan beton serta memahami hubungannya dengan porositas.

2. Metodologi

Metode penelitian yang digunakan pada penelitian ini adalah menelaah hasil-hasil penelitian dari Hwang et al, 2018; Ridengaoqier et al, 2021; Lee et al, 2020; Zhang et al, 2021; Benouis et al, 2011; dan Liu et al, 2021 sebagai data awal nilai w/c dan densitas spesimen beton. Berdasarkan data-data tersebut kemudian dilakukan perhitungan nilai modulus elastisitas dan kekuatan tekan beton dengan nilai porositas dari hasil pengujian ultrasonik. Data yang digunakan sangat beragam namun dibatasi pada kondisi tertentu. Pengujian ultrasonik menggunakan gelombang bunyi dengan interval frekuensi 50 KHz sesuai yang telah digunakan dari data referensi (Hwang et al, 2018; Ridengaoqier et al, 2021; Lee et al, 2020; Zhang et al, 2021; Benouis et al, 2011; Liu et al, 2021). Pengujian ini memiliki tujuan mendeteksi indikasi cacat dan diskontinuitas seperti retakkan, porositas, inklusi dan laminasi serta dapat juga mengukur ketebalan suatu material. Modulus elastisitas beton melalui pengujian ultrasonik dapat dihitung menggunakan persamaan 1. Perhitungan modulus elastisitas beton menggunakan variasi data kecepatan longitudinal dari frekuensi probe dan data pendukung densitas dan rasio Poisson. Skema uji ultrasonik pada beton atau keramik ditunjukkan pada gambar 1 dan proses pengujiannya ditunjukkan pada Gambar 2.

$$E = \frac{V_1^2 \rho (1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad (1)$$

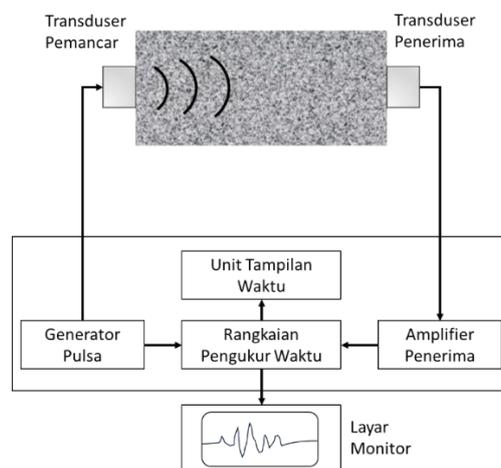
Dimana,

ν = rasio Poisson

E = modulus elastisitas (N/m²)

V_1 = kecepatan gelombang longitudinal (m/s)

ρ = densitas (kg/m³)



Gambar 1: Skema Pengujian Ultrasonik Pada Sampel Beton.



Gambar 2: Skema Pengujian Tidak Merusak Ultrasonik Pada Sampel Beton Dengan Jenis Transmisi Langsung (E. Hwang, 2018).

3. Data dan Pembahasan

Data-data awal yang diperoleh dari berbagai referensi untuk kemudian diolah sebagai bahan pengukuran modulus elastisitas, kekuatan tekan beton, ditunjukkan pada Tabel 1.

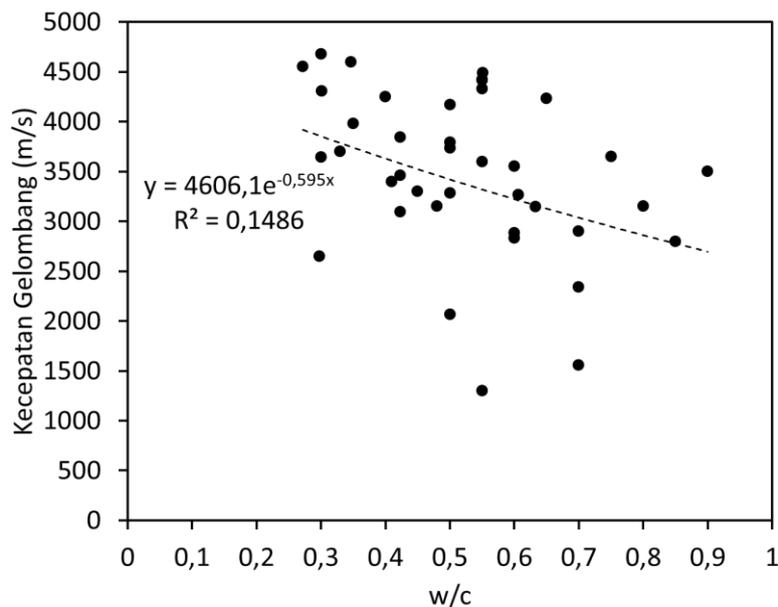
Tabel 1: Data w/c dan densitas dari masing-masing sampel

Spesimen	w/c	Densitas (kg/m ³)	Referensi
1	0,272	1420	16
2	0,298	1492	17
3	0,300	1492	17
4	0,300	1492	17
5	0,301	1492	17
6	0,330	1615	18
7	0,347	1420	16
8	0,350	1850	19
9	0,400	1850	19
10	0,410	1615	18
11	0,423	1920	20
12	0,423	1920	20
13	0,423	1920	20
14	0,450	1850	19
15	0,480	1615	18
16	0,500	1920	20
17	0,500	1920	20
18	0,500	1850	19
19	0,500	1769	21
20	0,500	1769	21
21	0,550	1769	22
22	0,550	1850	22
23	0,550	1850	22
24	0,550	1850	19
25	0,550	1615	18
26	0,551	1420	16

27	0,600	1850	19
28	0,600	1718	21
29	0,600	1718	21
30	0,600	1920	20
31	0,633	1920	20
32	0,650	1850	19
33	0,700	1850	19
34	0,700	1609	21
35	0,700	1609	21
36	0,750	1850	19
37	0,800	1850	19
38	0,850	1850	19
39	0,900	1850	19

Tabel 1 menunjukkan bahwa nilai densitas pada setiap spesimen tidak memiliki konsistensi jika hanya dibandingkan dengan nilai w/c nya. Karena komposisi yang digunakan dalam pembuatan beton tidak hanya terkait rasio w/c nya akan tetapi juga densitas dari agregat. Pada dasarnya beton terdiri atas dua unsur pembentuk yaitu pengisi dan pengikat. Setiap sampel beton memiliki komposisi unsur pembentuk yang beragam dengan kata lain saat rasio w/c sama masih terdapat perbedaan dari faktor pengisinya atau agregat. Agregat yang digunakan beragam mulai dari segi jenis maupun jumlahnya. Setiap material penyusun beton dapat mempengaruhi densitas yang selanjutnya berpengaruh pada nilai modulus elastisitas dan kekuatan tekannya. Hal ini dapat menjelaskan alasan mengapa densitas yang didapatkan tidak dapat terprediksi trennya meskipun pada kondisi rasio w/c yang sama.

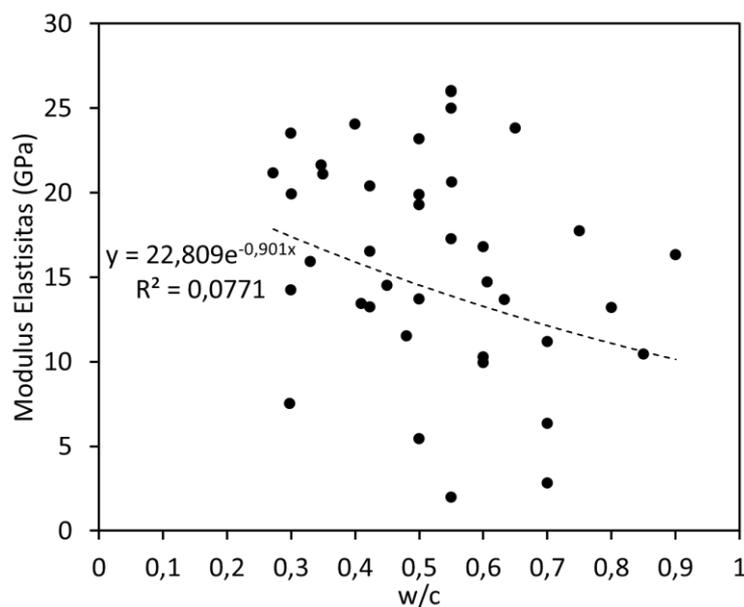
Data-data hasil pengujian ultrasonik berbeda setiap spesimen. Perbedaan terdapat pada kecepatan gelombang dihasilkan dan ditangkap oleh *transducer*. Data kecepatan gelombang terhadap rasio w/c ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3: Data perbandingan nilai rasio w/c terhadap kecepatan gelombang.

Kecepatan gelombang ultrasonik pada pengujian ultrasonik berkisar antara 1300 hingga 4680 m/s. Pada grafik diatas, data mengalami fluktuasi terhadap kecepatan gelombangnya seiring dengan bertambahnya jumlah rasio w/c. Hal ini disebabkan oleh nilai komposisi w/c yang sama memiliki densitas yang berbeda. Dari grafik diatas juga dapat diamati dengan terjadi kecenderungan penurunan dimana ketika

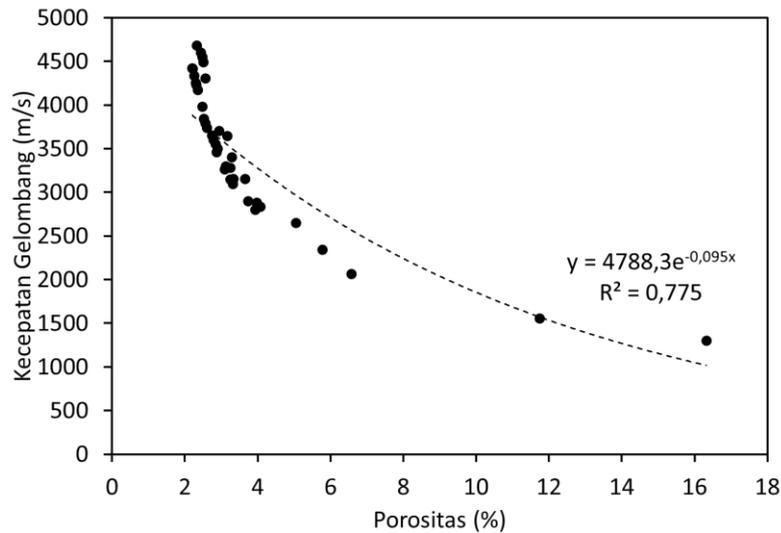
semakin besar rasio w/c maka kecepatan gelombang akan semakin menurun. Menurunnya kecepatan gelombang dapat menandakan adanya cacat atau pori dalam material sehingga pulsa yang dipancarkan tidak sepenuhnya ditangkap kembali oleh penerima. Fenomena ini disebut dengan istilah atenuasi gelombang. Atenuasi adalah Istilah yang digunakan untuk menggambarkan hilangnya sebagian energi ultrasonik secara bertahap terhadap jarak tempuhnya (M. Wang, 2021; L. Lin, 2020). Fenomena ini dapat disebabkan oleh dua faktor yaitu penyebaran (*scattering*) dan penyerapan (*absorption*) yang mana dapat terjadi selama pengujian. Atenuasi akibat sebaran yang terjadi karena adanya cacat pada material seperti spesimen yang tidak homogen dan adanya porositas berlebih pada spesimen sehingga mengakibatkan pulsa gema yang terbaca tidak optimal karena melewati bagian spesimen yang cacat. Sementara itu atenuasi akibat penyerapan dirasa kurang berpengaruh karena pemakaian frekuensi pengujian sebesar 50 KHz. Kemudian dari faktor densitas juga dapat berpengaruh pada besarnya nilai perambatan gelombang atau kecepatan gelombang. Bahwa densitas yang dimiliki masing-masing spesimen berbeda-beda. Besar atau kecilnya densitas dapat didefinisikan sebagai seberapa rapat butiran yang ada pada beton tersebut karena ketika butiran memiliki nilai kerapatan yang tinggi maka gelombang yang terpancarkan akan diterima kembali meskipun dengan besar kecepatan gelombang yang menurun. Hal ini dapat terjadi karena gelombang akan terus merambat pada suatu medium dengan baik ketika tidak ditemukan adanya diskontinuitas pada material. Akan terjadi penghamburan energi rambat gelombang saat gelombang melewati medium yang memiliki diskontinuitas atau disebut dengan atenuasi sebaran. Fenomena ini menjelaskan bahwa setiap medium maupun cacat yang ada pada material memiliki impedansi akustik yang berbeda-beda. Pulsa yang melewati suatu medium berbeda atau cacat, akan diserap sebagian dan dilanjutkan. Hal ini menyebabkan pulsa yang diterima mengalami penurunan akibat adanya cacat dalam hal ini porositas.



Gambar 4: Data perbandingan nilai rasio w/c terhadap modulus elastisitas.

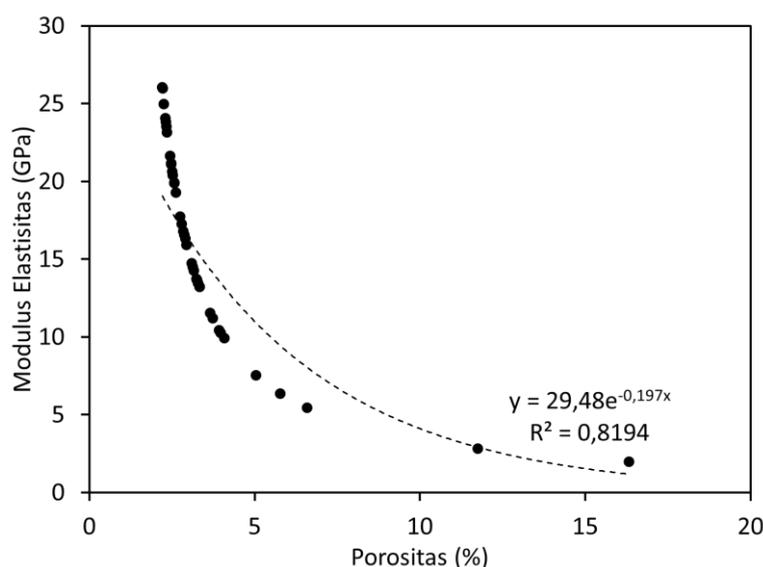
Pada Gambar 4 menunjukkan nilai modulus elastisitas mengalami fluktuasi. Rentang nilai modulus elastisitas pada penelitian ini adalah 2,808 hingga 26,046 GPa. Besarnya w/c dari setiap spesimen berpengaruh pada densitas beton yang dihasilkan. Nilai modulus elastisitas berbanding lurus dari besarnya kecepatan gelombang dan densitas beton tersebut. Dalam kata lain semakin besar kecepatan gelombang dan densitas dari material, maka nilai modulus elastisitasnya juga akan semakin besar. Gambar 4 juga menunjukkan kecenderungan menurun, dimana semakin besar nilai w/c maka nilai modulus elastisitas akan relatif menurun. Semakin besar rasio w/c pada spesimen menyebabkan jumlah air lebih banyak yang mana berdampak pada penyusutan atau kemungkinan terbentuknya rongga kosong menjadi lebih besar. Penyusutan dan porositas tersebut mengakibatkan besarnya modulus elastisitas menjadi turun. Nilai modulus elastisitas beton secara umum dari hasil perhitungan adalah 16,011 GPa

dan nilai modulus elastisitas beton menurut referensi adalah pada rentang 26 – 35 GPa (Mehta, 2005; Neville, 2010). Perbedaan nilai tersebut dapat terjadi karena adanya beberapa batasan dalam perhitungan yang dilakukan. Data densitas yang digunakan walaupun pada kondisi rasio w/c sama namun mungkin pada spesimennya terdapat perbedaan. Nilai rasio Poisson yang didapatkan terbatas dan dari data referensi tidak didapatkan nilai kecepatan rambat gelombang transversal untuk perhitungan rasio Poisson.



Gambar 5: Data perbandingan nilai porositas terhadap kecepatan gelombang.

Grafik perbandingan antara nilai porositas terhadap kecepatan gelombang dari masing-masing spesimen ditunjukkan pada Gambar 5. Porositas dari 39 spesimen pengujian ultrasonik ini memiliki rentang antara 2,210% hingga 16,324%. Fenomena atenuasi gelombang akibat faktor penyebaran dan impedansi akustik kemungkinan besar terjadi pada pengujian ultrasonik ini. Adanya porositas atau cacat pada material yang menyebabkan penurunan kecepatannya. Hal ini didukung dengan adanya persamaan pada grafik yang menunjukkan kecenderungan menurun relatif tajam antara hubungan nilai porositas dan kecepatannya. Dari persamaan grafik tersebut menunjukkan nilai R^2 sebesar 0,775 yang mana nilai tersebut mendekati akurat.



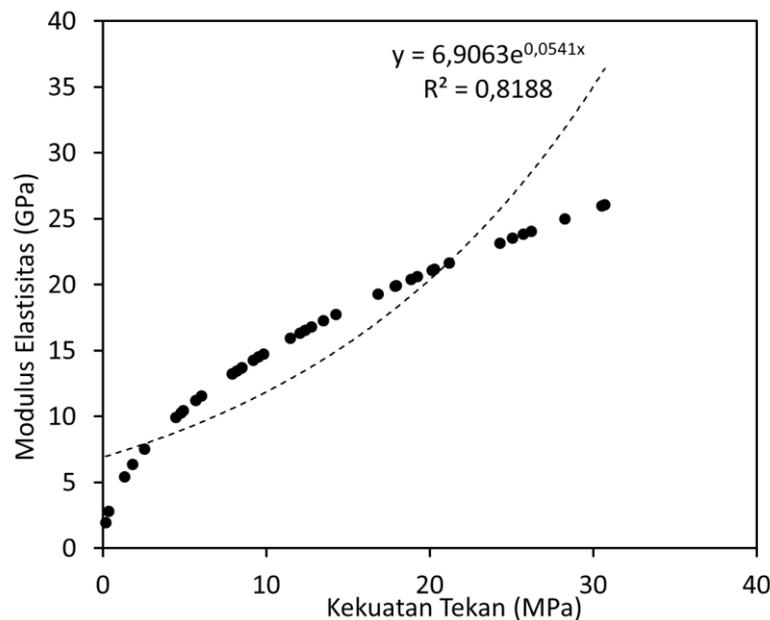
Gambar 6: Data perbandingan nilai porositas terhadap modulus elastisitas.

Pada Gambar 6 diatas menunjukkan bahwa nilai porositas memiliki hubungan dengan modulus elastisitas. Porositas pada suatu material akan mempengaruhi modulus elastisitas dan kekuatan tekan beton. Hadirnya porositas dapat disebabkan oleh inklusi seperti gas, debu, padatan lain yang terperangkap pada material saat proses pembuatan hingga membentuk suatu pori.

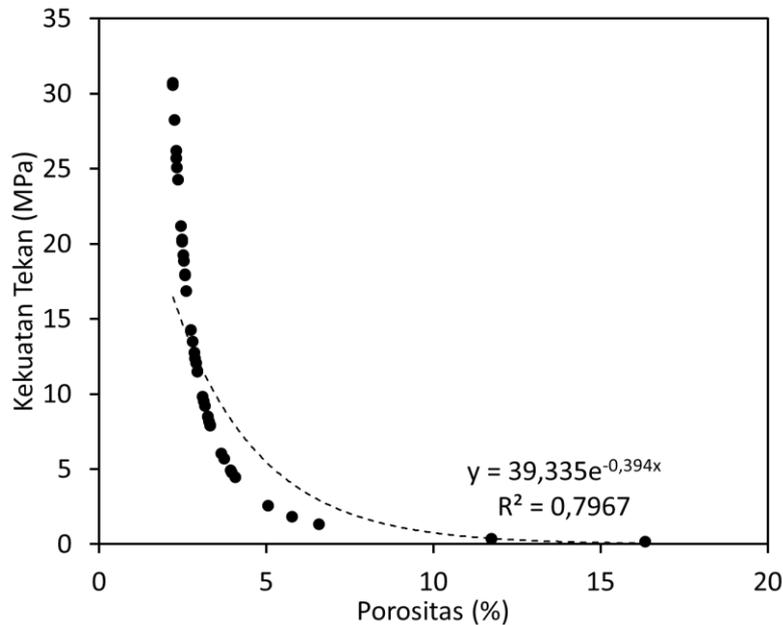
Berdasarkan ACI 318 (ACI, 2019), nilai modulus elastisitas memiliki hubungan dengan kekuatan tekan beton yang ditunjukkan pada persamaan 2.

$$E = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

Dengan E adalah modulus elastisitas dalam satuan GPa dan f'_c adalah kekuatan beton dalam satuan MPa. Maka dari persamaan tersebut didapatkan nilai kekuatan beton masing-masing spesimen seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Bahwa kekuatan tekan beton dan modulus elastisitas beton saling berpengaruh. Semakin besar kekuatan tekan beton maka semakin besar modulus elastisitas dari beton tersebut dan berlaku juga untuk sebaliknya. Semakin besar kekuatan tekan beton berarti beton tersebut mampu menahan beban dengan luas area yang sama. Hal ini sesuai dengan persamaan kecenderungan naik pada grafik diatas yang menunjukkan nilai positif. Kekuatan tekan beton hasil PENGUKURAN rata-ratanya adalah 13,366 MPa sementara kekuatan tekan beton pada referensi berkisar antara 17 – 28 MPa (Mehta, 2005; Neville, 2010). Hal ini mungkin disebabkan adanya galat dari persamaan 2. Nilai yang digunakan seharusnya adalah nilai dari variabel pengujian secara langsung.



Gambar 7: Data perbandingan nilai kekuatan tekan terhadap modulus elastisitas.



Gambar 8: Data perbandingan nilai porositas terhadap kekuatan tekan.

Gambar 8 menunjukkan perbandingan antara nilai porositas terhadap kekuatan tekan beton. Semakin besar porositas maka semakin menurunkan kekuatan tekan dari beton sesuai dengan teori dan didukung dari grafik dengan adanya kecenderungan menurun. Sehingga porositas yang dimiliki oleh beton perlu diperkecil jumlahnya supaya kekuatan yang dihasilkan menjadi lebih optimal.

4. Kesimpulan

Komposisi rasio air semen (w/c) memiliki pengaruh terhadap modulus elastisitas, porositas dan kekuatan tekan masing-masing beton. Seiring dengan bertambahnya komposisi w/c, persen porositas akan bertambah dan dengan terjadinya hal tersebut nilai modulus elastisitas, dan kekuatan tekan beton akan berkurang karena adanya tegangan terkonsentrasi sehingga mutu beton akan berkurang. Nilai w/c yang semakin meningkat menyebabkan modulus elastisitas dari beton cenderung turun. Turunnya modulus elastisitas tersebut karena adanya porositas sebesar 2,210% hingga 16,324%. Porositas yang besar tersebut menurunkan sifat beton dengan modulus elastisitas rata-rata 16,011 GPa dan kekuatan tekan rata-rata 13,366 MPa. Penelitian ini masih dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menambah jumlah data dan variabel untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal. Penelitian ini dapat membantu mengurangi uji coba yang biasa dilakukan untuk penelitian tahap awal dalam penentuan besar rasio w/c yang akan digunakan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara dan Institut Teknologi Bandung melalui dukungan fasilitas dalam pelaksanaan penelitian ini.

Referensi

- A. Benouis and A. Grini. Estimation of concrete's porosity by ultrasounds. *Physics Procedia* Vol. 21. pp 53 – 58. 2011.
- ACI Committee 318. *Building Code Requirements for Structural Concrete: (ACI 318-19); and Commentary (ACI 318R-19)*. Farmington Hills, MI. American Concrete Institute. 2019.
- Ashby, Michael,. *Materials: Engineering, Science, Processing and Design*. Edisi 4. Oxford. Butterworth-Heinemann Elsevier. 2019.
- ASM Handbook: *Nondestructive Evaluation and Quality Control*. Vol 17. ASM International. 2018.
- ASTM C597-16 *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. ASTM International. 2016.

- Barsoum, M.W. Fundamentals of Ceramics, Edisi 2. Florida. CRC Press. 2020.
- BS EN583-1:1999. Non-destructive testing – Ultrasonic examination Part 1: General principles. British Standard. 1999.
- Callister, William D., Materials Science and Engineering An Introduction, Edisi 10. New York. Wiley. 2018.
- E. Hwang et al. Evaluation of concrete degradation depending on heating conditions by ultrasonic pulse velocity. Construction and Building Materials Vol. 171. pp. 511–520. Elsevier Ltd. 2018.
- Heimann R.B. Classic and Advanced Ceramics. New York. Wiley. 2010.
- Hellier, C. Handbook of Nondestructive Evaluation. New York. McGraw-Hill. 2003.
- Jain, A., 2013. Combined Use of Non-Destructive Tests for Assessment of Strength of Concrete in Structure. Procedia Engineering Vol. 54. pp. 241 – 251. 2013.
- K. Güçlüer. Investigation of the effects of aggregate textural properties on compressive strength (CS) and ultrasonic pulse velocity (UPV) of concrete. Journal of Building Engineering Vol. 27. pp. 100949. Elsevier Ltd. 2020.
- L. Lin et al. Porosity estimation of abradable seal coating with an optimized support vector regression model based on multi-scale ultrasonic attenuation coefficient. NDT&E International Vol. 113. pp. 102272. Elsevier Ltd. 2020.
- M. Wang, D. Zheng, J. Dong et al. Comparison of ultrasonic attenuation models for small droplets measurement based on numerical simulation and experiment. Applied Acoustics Vol. 183. pp. 108334. Elsevier Ltd. 2021.
- Mehta, P. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. Edisi 3. New York. McGraw Hill. 2005.
- Naik, T.R. The Ultrasonic Pulse Velocity Method. Florida. CRC Press. 2004.
- Neville, A.M. Concrete technology. Edisi 2. London. Longman Scientific & Technical. 2010.
- Neville, A.M. Properties of Concrete. Edisi 5. Philadelphia. Trans-Atlantic Publications, Inc. 2012.
- R. E, S. Hatanaka, P. Palamy et al. Experimental study on the porosity evaluation of pervious concrete by using ultrasonic wave testing on surfaces. Construction and Building Materials Vol. 300. pp. 123959. Elsevier Ltd. 2021.
- Richerson, D.W. Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and Use in Design, Edisi 4. Florida. CRC Press. 2018.
- Smith, William., Foundations of Materials Science and Engineering, Edisi 6. New York. McGraw Hill. 2019.
- T. Lee, J. Lee. Setting time and compressive strength prediction model of concrete by nondestructive ultrasonic pulse velocity testing at early age. / Construction and Building Materials Vol. 252. pp. 119027. Elsevier Ltd. 2020.
- X. Liu, D. Sun, D. Liu et al. Simulation of ultrasonic propagation in porous cellular concrete materials. Construction and Building Materials Vol. 285. pp. 122852. Elsevier Ltd. 2021.
- Y. Zhang and F. Aslani. Compressive strength prediction models of lightweight aggregate concretes using ultrasonic pulse velocity. Construction and Building Materials Vol. 292. pp. 123419. Elsevier Ltd. 2021.