

Analisis Derajat Kerusakan dan Penurunan Modulus Elastisitas Material Cement Treated Base (CTB) menggunakan *UPV test* dan *Concrete Quality Designation (CQD)*

Ade Trias Safrudin¹, Suprpto Siswosukarto^{1,*}, Bambang Suhendro¹

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta¹

Koresponden*, Email: suprpto.siswosukarto@ugm.ac.id

	Info Artikel	Abstract
Diajukan	18 Agustus 2023	<i>Cement-treated base (CTB) is a type of foundation material commonly used in pavement structures which initially has high stiffness, but due to repeated loads CTB tends to experience more cracks which can cause a decrease in its elastic modulus. This study aims to determine the extent of damage and decrease in the value of CTB's elastic modulus before and after cracking through ultrasonic pulse velocity (UPV) test and unconfined compressive strength (UCS) tests on CTB cylinder samples. The CTB material quality index was evaluated using a concrete quality designation (CQD). The results showed that the magnitude of stress applied to CTB affects the degree of damage, and the degree of damage to CTB significantly affects the material's modulus of elasticity. The greater the degree of damage to CTB, the smaller the elastic modulus will be. For applied stress with CTB damage level of 32%, the elastic modulus decreases by 33.55%. The level of damage caused by the application of the maximum stress (100%) on CTB sample reached 95.29%, and the modulus of elasticity decreased by 83.30%. The CTB sample with 95.29% degree of damage has the same elastic modulus as the unbound granular aggregate material.</i>
Diperbaiki	25 November 2023	
Disetujui	30 November 2023	

Keywords: *cement-treated base (CTB), crack, concrete quality designation (CQD), ultrasonic pulse velocity, elastic modulus.*

Abstrak

*Cement-treated base (CTB) merupakan salah satu jenis material fondasi dalam struktur perkerasan yang awalnya memiliki kekakuan yang cukup tinggi, namun akibat repetisi beban CTB cenderung mengalami retak yang semakin banyak yang dapat menimbulkan penurunan nilai modulus elastisitas. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui derajat kerusakan dan penurunan nilai modulus elastisitas pada CTB sebelum dan setelah mengalami retak melalui pengujian *ultrasonic pulse velocity (UPV)* dan pengujian *unconfined compressive strength (UCS)* pada sampel silinder CTB. Indeks kualitas material CTB dievaluasi menggunakan *concrete quality designation (CQD)*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa besarnya tegangan yang dialami oleh CTB mempengaruhi derajat kerusakannya, dan derajat kerusakan pada CTB sangat berpengaruh terhadap modulus elastisitas material. Semakin besar derajat kerusakan pada CTB, maka modulus elastisitasnya akan semakin kecil. Untuk tegangan dengan tingkat kerusakan CTB 32%, modulus elastisitas menurun 33.55%. Tingkat kerusakan yang ditimbulkan akibat penerapan tegangan maksimum (100%) pada sampel CTB mencapai 95.29%, dan modulus elastisitasnya menurun 83.30%. Sampel CTB dengan derajat kerusakan 95.29% memiliki nilai modulus elastisitas yang sama seperti material agregat granular tak terikat.*

Kata kunci: *cement-treated base (CTB), retak, concrete quality designation (CQD), ultrasonic pulse velocity, modulus elastisitas.*

1. Pendahuluan

Infrastruktur transportasi yang andal dan efisien merupakan tulang punggung perkembangan ekonomi dan sosial suatu negara. Salah satu komponen penting dalam infrastruktur transportasi adalah perkerasan, yang berfungsi sebagai lapisan permukaan yang menopang beban kendaraan, mengoptimalkan kenyamanan pengguna jalan, dan menjaga keselamatan transportasi. Struktur perkerasan merupakan susunan dari beberapa lapisan material yang diletakkan di atas tanah dasar, umumnya terdiri dari lapis permukaan, lapis fondasi (*base*), dan atau lapis fondasi bawah (*subbase*), serta lapis tanah dasar (*subgrade*)[1]. Salah satu jenis material yang jamak digunakan dalam struktur perkerasan, baik pada

jalan raya (*highway*) maupun landasan (*airfield*) adalah *cement-treated base (CTB)*. CTB merupakan campuran dari tanah dan atau agregat dengan semen *portland* dan air dalam kadar tertentu yang dapat mengeras setelah dilakukan pematangan dan pengeringan untuk membentuk bahan perkerasan yang kuat dan tahan lama [2]. CTB mampu meredam tegangan akibat beban lalu lintas dan mendistribusikannya ke area yang lebih luas, sehingga dapat mengurangi tegangan yang diterima oleh tanah dasar-[2][3][4][5].

Namun pada beberapa kondisi, retakan dapat terjadi pada CTB akibat faktor-faktor seperti perubahan suhu dan perubahan kadar air [6], atau pembebanan berlebih [7]. Retakan-retakan ini dapat mengurangi integritas struktural CTB dan

mempengaruhi karakteristik mekaniknya. Penelitian sebelumnya telah melaporkan bahwa kerusakan pada CTB dapat menyebabkan perubahan signifikan pada sifat mekaniknya [8][9]. Uddin dkk, melakukan perhitungan modulus elastisitas CTB pada struktur perkerasan kaku eksisting yang mengalami retak melalui analisis *backcalculation*, hasil evaluasi menyebutkan bahwa lapis CTB yang retak mengalami penurunan modulus elastisitas hingga 56% [10]. Modulus elastisitas merupakan ukuran dari kekakuan atau ketahanan terhadap deformasi pada suatu material [11]. Modulus elastisitas digunakan sebagai salah satu parameter utama material dalam desain maupun evaluasi struktur perkerasan [12].

Berdasarkan hasil studi terdahulu, masih terdapat kekurangan informasi yang menjelaskan hubungan besarnya derajat kerusakan dan perubahan nilai modulus elastisitas pada CTB. Nilai modulus elastisitas CTB yang mengalami rusak dibutuhkan sebagai input dalam simulasi numerik menggunakan metode elemen hingga, untuk melihat dampaknya terhadap respon struktur perkerasan. Oleh karena itu, fokus dari penelitian ini adalah untuk mengkuantifikasi derajat kerusakan pada CTB dan perubahan nilai modulus elastisitasnya melalui kajian secara eksperimental di Laboratorium. Pembuatan sampel CTB mengacu pada spesifikasi P-304 *cement treated base* [13]. Uji *ultrasonic pulse velocity* (UPV) digunakan untuk mengukur perubahan modulus elastisitas CTB. Uji UPV semacam ini umumnya digunakan dalam upaya menentukan karakteristik mekanik material, utamanya modulus elastisitas material beton [14][15][16]. Sedangkan derajat kerusakan sampel CTB ditentukan melalui *concrete quality designation* (CQD) berdasarkan hasil uji UPV [17].

2. Metode

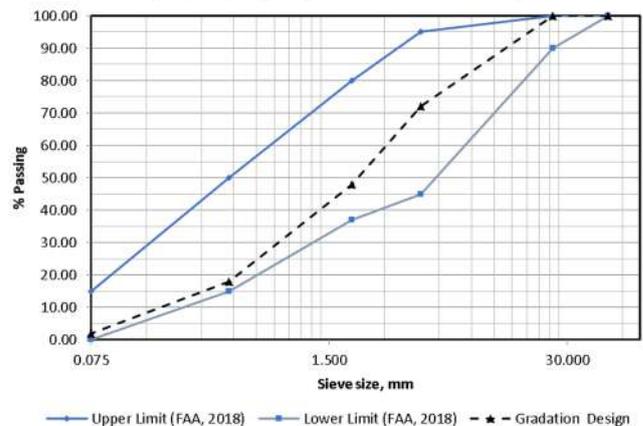
Penelitian ini dilakukan secara eksperimental di Laboratorium Bahan Bangunan, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, dengan tahapan dan metode sebagai berikut.

2.1 Persiapan Bahan

Material utama yang digunakan dalam pembuatan sampel CTB adalah agregat batu pecah andesit yang diperoleh dari Clereng, Kulonprogo, seperti yang ditampilkan pada **Gambar 1**. Gradasi agregat yang digunakan mengacu pada spesifikasi *federal airfield association* (FAA) pada item P-304 *cement-treated base* (CTB) [13], seperti yang disajikan pada **Gambar 2**. Bahan pengikat yang digunakan pada campuran CTB adalah semen *portland* tipe 1. Air yang digunakan dalam campuran CTB berasal dari sumber air bersih yang berada di Laboratorium Bahan Bangunan, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada.



Gambar 1. Agregat yang digunakan dalam campuran CTB



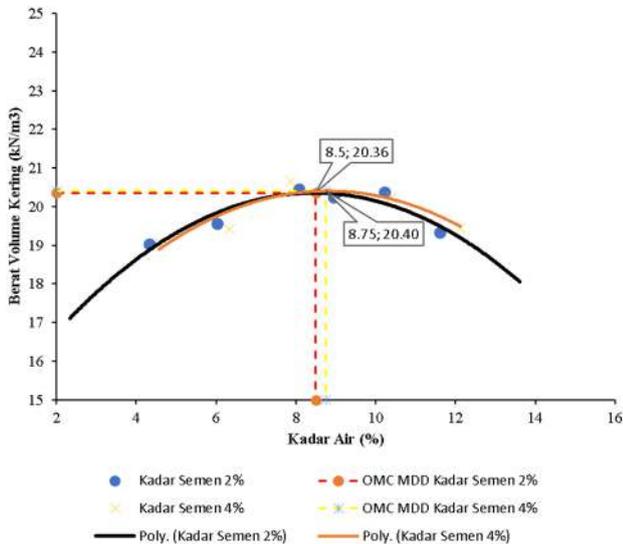
Gambar 2. Gradasi agregat campuran CTB

2.2 Desain Campuran

Sebelum pembuatan sampel, desain campuran (*mix design*) sampel harus ditentukan terlebih dahulu agar dapat diperoleh kuat tekan (*compressive strength*) CTB seperti yang disyaratkan, yaitu 2.1 MPa hingga 3.45 MPa pada saat sampel berumur 7 hari [13]. Desain campuran (*mix design*) merupakan proses penentuan komposisi dan proporsi bahan-bahan yang digunakan dalam pembuatan CTB.

Portland Cement Association (PCA) memberikan perkiraan kebutuhan kadar semen untuk material agregat granular 3-5% [18]. Pada penelitian ini dilakukan percobaan (*trial*) penggunaan kadar semen 2% dan 4% dalam campuran CTB. Adapun kadar air yang digunakan dalam campuran merujuk pada hasil uji pemadatan *modified proctor* berdasarkan SNI1743:2008 [19], seperti yang ditunjukkan dalam **Gambar 3**. *Optimum moisture content* (OMC) merupakan jumlah air yang diperlukan dalam campuran CTB untuk mencapai kepadatan maksimum atau *maximum dry density* (MDD). Adapun hasil *trial* pembuatan dan pengujian sampel CTB dengan kadar semen 2% dan 4% serta kadar air 8.5% dan 8.75%, diperoleh nilai kuat tekan sampel CTB seperti yang disajikan dalam **Tabel 1**. Berdasarkan hasil *trial* uji kuat tekan yang tercantum pada **Tabel 1**, diketahui bahwa

campuran dengan kadar semen 4% memiliki kuat tekan rata-rata 6.21 MPa, sehingga melebihi nilai kuat tekan yang disyaratkan oleh FAA. Maka dari itu, kadar semen dan kadar air yang digunakan dalam campuran untuk pembuatan sampel utama CTB masing-masing sebesar 2% dan 8.5% .



Gambar 3. Hasil uji pemadatan *modified proctor* pada campuran CTB

Tabel 1. Hasil *trial* uji kuat tekan sampel silinder CTB umur 7 hari

Kadar Semen (%)	OMC (%)	MDD (kN/m ³)	f'c (MPa)	\bar{x} f'c (MPa)	Spek. FAA 2018 (MPa)
2	8.5	20.36	2.66	2.44	2.1 – 3.45
			2.32		
			2.36		
			5.60		
4	8.75	20.40	6.75	6.21	
			6.27		

2.3 Pembuatan Sampel

Pada penelitian ini, pembuatan sampel CTB mengacu pada ASTM D1633 [20]. Terdapat dua jenis sampel yang diproduksi, yaitu sampel silinder berukuran 100 mm (diameter) dan 200 mm (tinggi) sejumlah 12 sampel yang digunakan untuk pengujian kuat tekan tak terkekang (*unconfined compressive strength test*) dan pengujian *ultrasonic pulse velocity (UPV test)*, serta sampel silinder berukuran 150 mm (diameter) dan 300 mm (tinggi) sejumlah 2 sampel, untuk pengujian modulus elastisitas statik [5][20]. Proses pemadatan dalam pembuatan sampel CTB menggunakan alat penumbuk (*rammer*) dengan berat 4.5 kg, seperti yang digunakan dalam uji pemadatan *modified proctor*. Jumlah tumbukan ditentukan berdasarkan perhitungan perbandingan antara volume silinder sampel CTB dengan volume tabung alat pemadatan dikalikan 56 tumbukan, seperti pada **Persamaan 1** [21].

$$T = \frac{V_C}{V_P} \times 56 \quad (1)$$

dimana,

T = jumlah tumbukan

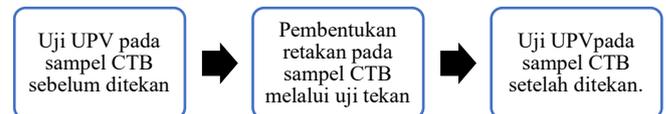
V_C = Volume silinder sampel CTB

V_P = Volume silinder pemadatan

Berdasarkan perhitungan menggunakan **Persamaan 1**, maka diperoleh jumlah tumbukan untuk pembuatan sampel ukuran 100×200 mm sebanyak 38 kali, dan untuk sampel ukuran 150×300 mm sebanyak 127 kali. Pembuatan sampel CTB dilakukan secara bertahap dengan membagi menjadi 5 lapisan. Pemadatan dilakukan tiap lapisan agar dapat diperoleh tingkat kepadatan yang maksimum pada sampel CTB. *Curing* pada sampel silinder dilakukan dengan cara membungkus sampel silinder dengan menggunakan plastik agar menghindari kehilangan air yang berlebihan akibat penguapan. Sampel silinder disimpan di dalam *box* penyimpanan yang diletakkan di dalam tempat yang kering dengan suhu ruang ($\pm 25^\circ\text{C}$).

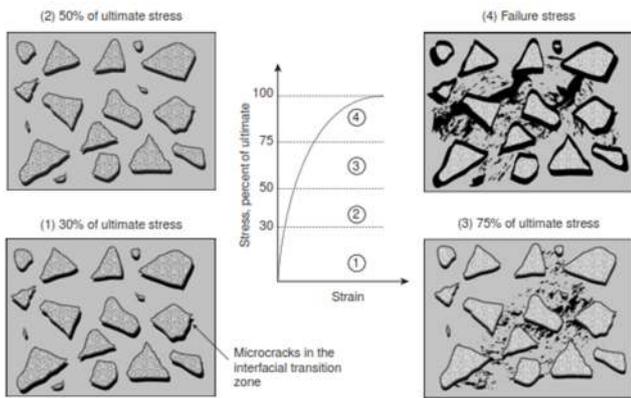
2.4 Pengujian Laboratorium

Pada penelitian ini, digunakan kombinasi antara uji kuat tekan tak terkekang (*unconfined compressive strength test*) dan uji *ultrasonic pulse velocity (UPV test)*. Secara garis besar, tahapan pengujian untuk mengestimasi derajat kerusakan dan perubahan nilai modulus elastisitas pada material CTB sebelum dan setelah retak ditunjukkan pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Tahapan pengujian untuk menghitung derajat kerusakan dan perubahan nilai modulus elastisitas pada material CTB sebelum dan setelah retak

Pertama, dilakukan pengujian UPV pada sampel silinder CTB sebelum ditekan untuk memperoleh nilai kecepatan gelombang pada kondisi tidak retak. Setelah itu, pembentukan retakan (*cracks*) pada sampel CTB dilakukan melalui alat uji tekan dengan variasi pemberian tegangan secara bertahap. Pemberian tegangan diupayakan mencapai kisaran 30%, 50%, 75%, dan 100% dari tegangan maksimum yang mampu ditahan oleh sampel CTB, mengacu pada tahapan pembentukan retakan dalam struktur beton seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 5** [22]. Seluruh sampel yang telah ditekan sesuai target tegangan yang ditetapkan, diuji UPV kembali untuk memperoleh nilai kecepatan gelombang pada kondisi retak.



Gambar 5. Tahapan terbentuknya retak pada material Beton[22]

a. Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity (UPV Test)

American Concrete Institute (ACI) menyatakan bahwa UPV test merupakan metode uji *non-destructive* untuk beton yang didasarkan pada pengukuran kecepatan gelombang ultrasonic yang merambat pada lintasan dalam suatu massa. Secara prinsip, kecepatan perambatan gelombang bergantung pada *density* dan *elastic constant* dari suatu massa. Oleh karena itu, apabila *density* dan kecepatan perambatan gelombang diketahui, maka sifat elastis material dapat diperkirakan [23]. ASTM C597-02 memberikan Persamaan untuk menghitung kecepatan gelombang sebagai berikut[24].

$$V = \frac{L}{T} \tag{2}$$

$$V = \sqrt{\frac{E_d(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \tag{3}$$

dari **Persamaan 3** diatas, dapat diubah menjadi **Persamaan 4** untuk menghitung nilai modulus elastisitas dinamik material [16].

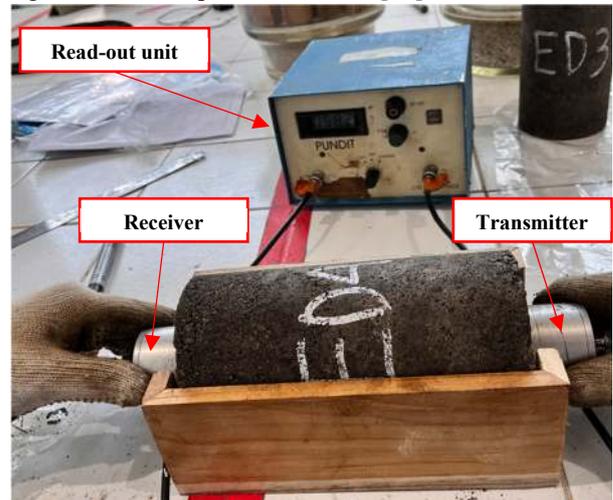
$$E_d = \frac{V^2 \rho(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \tag{4}$$

dimana,

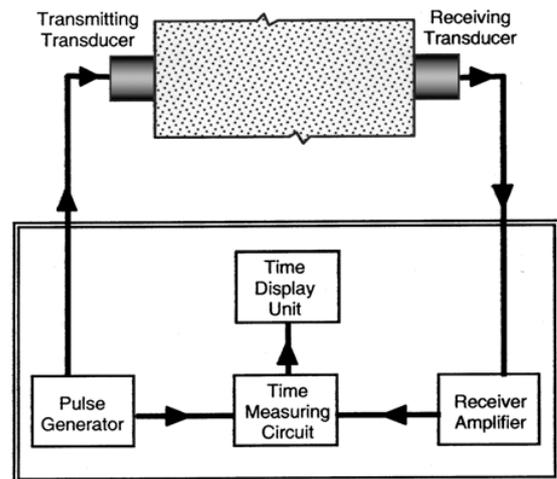
- V = kecepatan gelombang (m/s)
- L = jarak antar permukaan tengah transducer (mm)
- T = adalah *transit time* (s)
- E_d = *dynamic modulus of elasticity* (N/mm²)
- ρ = *material density*
- ν = *poisson's ratio*; CTB tidak retak = 0.2; CTB retak = 0,35 [25].

Pengujian UPV menggunakan alat *portable unit non destructive indicator tester* (PUNDIT) yang terdiri dari *read-out unit* yang menampilkan hasil pembacaan *transit time*, dua *transducer* (*transmitter* dan *receiver*), dan kabel penghubung seperti yang ditampilkan pada **Gambar 6**. Sebelum digunakan untuk mengukur *transit time* pada sampel, alat PUNDIT harus dikalibrasi terlebih dahulu dengan menggunakan *reference bar*. Agar dapat diperoleh hasil uji UPV yang lebih akurat, digunakan metode *direct transmission*

dimana *transmitter* dan *receiver* masing-masing ditempelkan saling berhadap-hadapan secara longitudinal pada permukaan atas dan permukaan bawah sampel silinder CTB seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 7** [24].



Gambar 6. Pengujian UPV pada sampel silinder CTB menggunakan PUNDIT



Gambar 7. Konfigurasi pengujian UPV menggunakan metode *direct transmission*[24]

b. Pengujian Unconfined Compressive Strength (UCS Test)

Kuat tekan (f'_c) adalah besarnya gaya tekan aksial yang mampu diterima oleh sampel CTB per luas penampang melintang, hingga sampel mengalami keruntuhan [20]. Tujuan dari uji ini adalah untuk mengetahui kapasitas sampel CTB dalam menerima beban/gaya tekan aksial. Umumnya, nilai kuat tekan untuk syarat konstruksi dilakukan pada umur 28 hari. Pada penelitian ini, kuat tekan sampel CTB pada umur 28 hari dijadikan sebagai acuan dalam menentukan tegangan yang akan diterapkan saat pembentukan retakan.

c. Pengujian Modulus Elastisitas Statik

Pengujian modulus elastisitas statik dilakukan pada 2 sampel silinder berukuran 150×300 mm. Sebelum dilakukan pengujian, sampel silinder 150×300 mm terlebih dahulu dipasang *compressometer* untuk mengukur regangan (*strain*) yang terjadi ketika proses penekanan. Setelah *compressometer* terpasang, sampel diletakkan pada mesin uji tekan tepat berada di posisi tengah/pusat dari sumbu beban. Ketika pengujian dimulai, pembacaan jarum pengukur regangan dan beban dilakukan secara bersamaan dengan interval per 10 detik. Proses penekanan dilakukan hingga sampel mengalami kegagalan/runtuh. Hasil pembacaan beban dan regangan dibuat dalam bentuk grafik hubungan antara tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*). Adapun modulus elastisitas statik dapat dihitung melalui **Persamaan 5** berikut [26].

$$E = \frac{(s_2 - s_1)}{(\epsilon_2 - 0,000050)} \quad (5)$$

dimana,

E = modulus elastisitas (MPa)

S₁ = tegangan pada saat nilai kurva regangan $\epsilon_2 = 0.000050$ (kg/cm²)

S₂ = tegangan pada 40% tegangan runtuh (kg/cm²)

ϵ_2 = nilai regangan yang terjadi pada saat S₂

2.5 Penentuan Derajat Kerusakan

Penentuan derajat kerusakan pada CTB diperlukan untuk mengkorelasikan kondisi CTB sebelum dan sesudah retak dengan perubahan nilai modulus elastisitasnya. Sampai saat ini, sejauh yang penulis pahami belum adanya literatur yang membahas tentang penentuan derajat kerusakan pada CTB, maka dari itu pada penelitian ini diusulkan *Concrete Quality Designation* (CQD) sebagai alat untuk menentukan derajat kerusakan pada sampel CTB. *Concrete Quality Designation* (CQD) merupakan indeks kualitas material beton yang digunakan untuk menilai tingkat kerusakan beton terhadap kondisi aslinya/yang tidak rusak [17].

CQD didasarkan pada perbandingan antara pengukuran UPV pada struktur beton yang rusak dan pengukuran UPV pada spesimen silinder beton yang utuh/tidak rusak. Adapun kriteria CQD dapat dilihat pada **Tabel 2**. CQD dinyatakan sebagai persentase yang diperoleh dari selisih nilai UPV pada beton yang rusak dan nilai referensi (V_{ref}), kemudian dinormalisasikan oleh selisih antara nilai UPV yang diukur pada sampel beton utuh dan nilai referensi (V_{ref}), seperti yang tercantum dalam **Persamaan 6**. Nilai referensi (V_{ref}) yang digunakan adalah 1500 m/s. Nilai referensi (V_{ref}) merupakan nilai UPV pada beton yang rusak berat. Nilai referensi

tersebut dianggap sama seperti nilai UPV yang melewati air, karena air tidak memiliki kekuatan tekan[17].

Merujuk pada konsep CQD, maka dalam penelitian ini indeks kualitas CTB ditentukan melalui perbandingan antara pengukuran UPV pada sampel CTB sebelum dibebani dan pengukuran UPV pada sampel CTB setelah dibebani. Hasil perhitungan persentase kualitas CTB berdasarkan **Persamaan 6** kemudian dimasukkan ke dalam kriteria seperti yang disajikan dalam **Tabel 2**.

$$CQD = \frac{V_{cracked} - V_{ref}}{V_{uncracked} - V_{ref}} \times 100 \quad (6)$$

dimana,

$V_{cracked}$ = nilai UPV pada sampel setelah ditekan (m/s)

$V_{uncracked}$ = nilai UPV pada sampel sebelum ditekan (m/s)

V_{ref} = nilai UPV referensi = 1500 m/s

CQD = *concrete quality designation* (%)

Tabel 2. Kriteria dalam *concrete quality designation* [17]

Kualitas beton	CQD (%)
<i>Excellent</i>	> 100
<i>Good</i>	70 – 100
<i>Questionable</i>	50 – 70
<i>Poor</i>	20 – 50
<i>Very poor</i>	10 – 20
<i>Significant anomaly</i>	< 10

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Derajat Kerusakan pada Sampel CTB

Salah satu kelemahan dari material CTB yaitu sifatnya yang getas (*brittle*) apabila menerima tegangan yang tinggi [9]. Pada penelitian ini, total 12 sampel silinder CTB diuji menggunakan pengujian *ultrasonic pulse velocity* (UPV) dan pengujian *unconfined compressive strength* (UCS), untuk memperoleh informasi terkait derajat kerusakan dan perubahan modulus elastisitas pada sampel CTB setelah ditekan. Pengukuran dimensi dan waktu tempuh (*transit time*) gelombang *ultrasonic* yang melewati sampel CTB dilakukan baik sebelum maupun setelah sampel ditekan. Dengan hasil pengukuran tersebut, nilai kecepatan gelombang *ultrasonic* (V) pada sampel yang tidak retak (*uncracked*) dan yang retak (*cracked*) dapat diestimasi melalui **Persamaan 2**. Perubahan nilai kecepatan gelombang *ultrasonic* (V) pada sampel CTB kemudian dianalisis menggunakan *concrete quality designation*, sehingga diperoleh derajat kerusakan dan indeks kualitas sampel CTB. Adapun hasil analisis indeks kualitas CTB disajikan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Hasil analisis indeks kualitas material CTB setelah ditekan

Kode sampel	% Tegangan maksimum	Beban (kN)	Kecepatan gelombang, V (m/s)		CQD (%)	Kualitas
			Sebelum ditekan	Setelah ditekan		
ED1	100	30.50	3460.87	1479.01	-1,07*	<i>Significant Anomaly</i>
ED2		28.50	3474.78	1778.78	14.12	<i>Very Poor</i>
ED3		30.50	3447.92	999.23	-25.71*	<i>Significant Anomaly</i>
ED4	75	22.50	3436.43	2833.81	68.88	<i>Questionable</i>
ED5		22.50	3467.71	2791.84	65.65	<i>Questionable</i>
ED6		22.50	3427.96	2839.03	69.45	<i>Questionable</i>
ED7	50	15.00	3415.24	3193.11	88.40	<i>Good</i>
ED8		15.00	3354.69	3051.07	83.63	<i>Good</i>
ED9		15.00	3354.62	2968.01	79.15	<i>Good</i>
ED10	30	9.00	3297.34	3205.98	94.92	<i>Good</i>
ED11		9.00	3365.16	3229.10	92.70	<i>Good</i>
ED12		9.00	3524.73	3418.52	94.75	<i>Good</i>

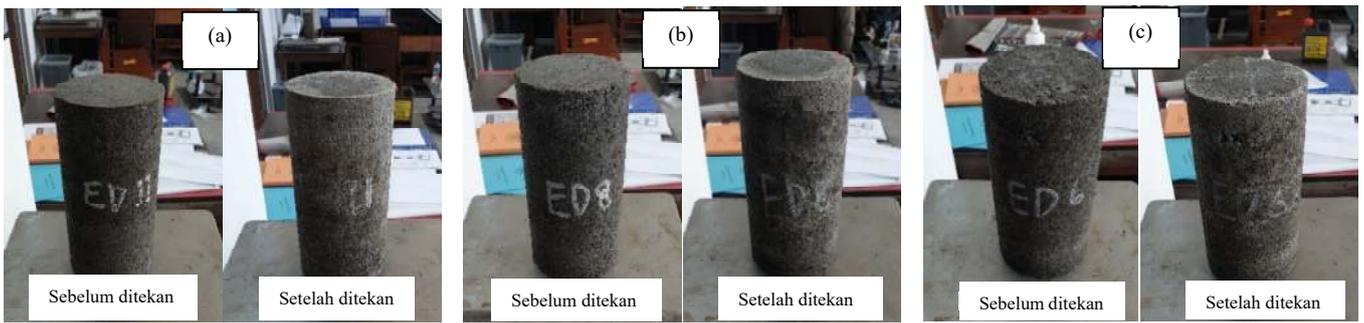
*angka CQD yang bernilai negatif dianggap 0%

Berdasarkan **Tabel 3**, diketahui bahwa sampel CTB mengalami penurunan kualitas secara bertahap seiring dengan meningkatnya tegangan yang dialaminya. Sampel CTB yang diberi tegangan 30% dan 50% dari tegangan maksimum tidak mengalami penurunan kualitas yang signifikan. Pada sampel yang diberi tegangan 30% (ED10 – ED12), angka CQD rata-rata sebesar 94.12% atau derajat kerusakan sebesar 5.88%, sehingga sampel ED10 – ED12 masih memiliki kualitas yang baik (*good*). Pada sampel yang diberi tegangan 50% (ED7 – ED9), angka CQD rata-rata sebesar 83.73% atau derajat kerusakan sebesar 16.27%, sehingga sampel ED7 – ED9 masih tergolong memiliki kualitas yang baik (*good*). Secara visual, sampel CTB yang diberi tegangan 30% dan 50% hampir tidak mengalami perubahan bentuk/deformasi dan tidak terlihat adanya retakan pada permukaan luar sampel, seperti yang ditampilkan pada **Gambar 8**.

Pada sampel yang diberi tegangan 75% (ED4 – ED6), angka CQD rata-rata sebesar 68.00% atau derajat kerusakan mencapai 32.00%, sehingga sampel ED10 – ED12 masuk ke dalam kategori kualitas yang diragukan (*questionable*). Dengan derajat kerusakan diatas 30%, secara visual masih belum terdapat retakan pada permukaan luar, tetapi dari hasil pengukuran dimensi terdapat perubahan yang kecil. Sedangkan pada sampel yang diberi tegangan 100% atau beban maksimum (ED1 – ED3), terjadi penurunan kualitas yang sangat signifikan. Adanya kerusakan yang sangat parah pada sampel ED1 dan ED3 (**Gambar 9**) menyebabkan

kecepatan gelombang *ultrasonic* yang melintasi sampel tersebut merosot secara tajam. Nilai kecepatan gelombang *ultrasonic* pada sampel ED1 dan ED3 setelah pembebanan kurang dari nilai kecepatan gelombang referensi (1500 m/s), sehingga ketika dihitung menggunakan **Persamaan 6** diperoleh angka CQD yang bernilai negatif. Hasil tersebut menunjukkan bahwa nilai kecepatan gelombang referensi yang digunakan kurang kompatibel apabila diterapkan pada sampel CTB yang mengalami kerusakan parah. Dalam literatur disebutkan bahwa dibutuhkan studi lebih lanjut dalam menentukan nilai gelombang referensi (V_{ref}) yang digunakan selain pada struktur beton hidrolik [17].

Oleh karena itu, angka CQD pada sampel ED1 dan ED3 dianggap 0% sebagai representasi kualitas material paling buruk. Dengan CQD yang kurang dari 10%, maka sampel ED1 dan ED3 dikategorikan ke dalam kualitas *significant anomaly*. Sedangkan pada sampel ED2, secara visual terjadi kerusakan berupa retak-retak, namun tidak sebesar retak yang terjadi pada sampel ED1 dan ED3. Karena nilai CQD hanya 14.12% atau derajat kerusakannya mencapai 85.88%, maka sampel ED2 dikategorikan ke dalam kualitas yang sangat buruk (*very poor*). Jika dirata-rata, angka CQD pada sampel ED1 – ED3 hanya sebesar 4.71%, yang berarti derajat kerusakannya mencapai 95.29%. Sampel yang masuk ke dalam kategori *very poor* dan *significant anomaly* dianggap kualitasnya sama seperti material berbutir (*granular material*) [17]



Gambar 8. Contoh kondisi sampel sebelum dan setelah diberi tegangan: a) tegangan 30%; b) tegangan 50%; c) tegangan 75%



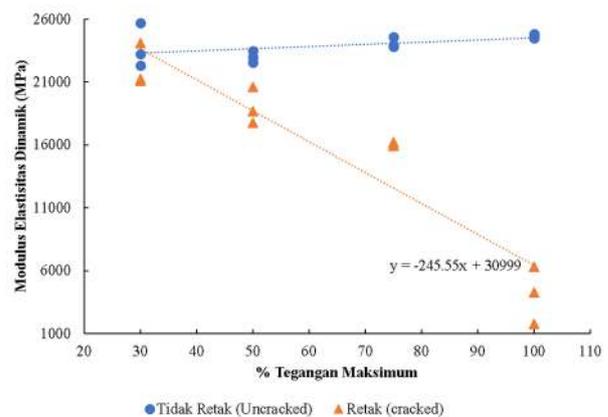
Gambar 9. Kondisi sampel sebelum dan setelah diberi tegangan maksimum (100%)

3.2 Perubahan Modulus Elastisitas pada Sampel CTB

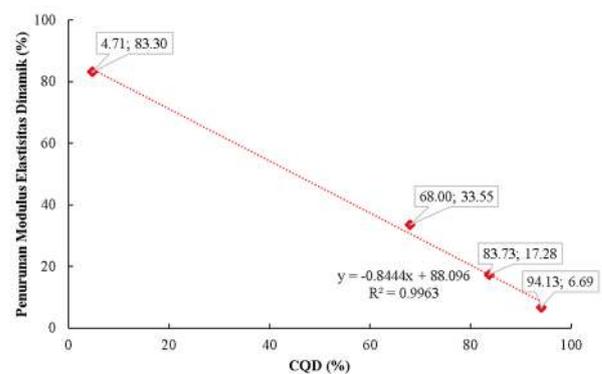
Data hasil pengujian UPV juga digunakan untuk menghitung nilai modulus elastisitas dinamik sampel CTB sebelum dan setelah dibebani. Rangkuman hasil perhitungan nilai modulus elastisitas dinamik disajikan pada

Tabel 4. Gambar 10 menunjukkan *trend* dimana nilai modulus elastisitas dinamik semakin menurun seiring dengan bertambahnya tegangan yang diterapkan pada sampel CTB. Penurunan nilai modulus elastisitas dinamik juga diiringi dengan meningkatnya derajat kerusakan atau menurunnya kualitas pada CTB. Hubungan antara indeks kualitas (CQD) dan penurunan modulus elastisitas dinamik CTB ditunjukkan pada **Gambar 11**. Semakin tinggi indeks kualitas (CQD) material CTB, maka semakin kecil penurunan nilai modulus elastisitas dinamik.

Modulus elastisitas merupakan sifat material yang dikaitkan dengan deformasi struktural (Santos, 2017). Dalam konteks penelitian ini, saat sampel CTB ditekan/dibebani, maka material akan mengalami deformasi. Deformasi ini dapat menyebabkan pergeseran dan perubahan dalam struktur internal material. Penerapan tegangan 30% dan 50% dari tegangan maksimum pada sampel CTB tidak menyebabkan deformasi yang berarti, sehingga penurunan modulus elastisitas dinamik CTB kurang dari 20%. Tetapi pada sampel yang diberi tegangan 75% dan 100% dari tegangan maksimumnya mengalami



Gambar 10. *Trend* modulus elastisitas dinamik pada sampel CTB yang tidak retak (*uncracked*) dan yang retak (*cracked*)



Gambar 11. Hubungan penurunan modulus elastisitas dinamik dan indeks kualitas CQD pada material CTB

Tabel 4. Hasil perhitungan nilai modulus elastisitas dinamis (E_d) pada sampel CTB yang tidak retak (*uncracked*) dan yang retak (*cracked*)

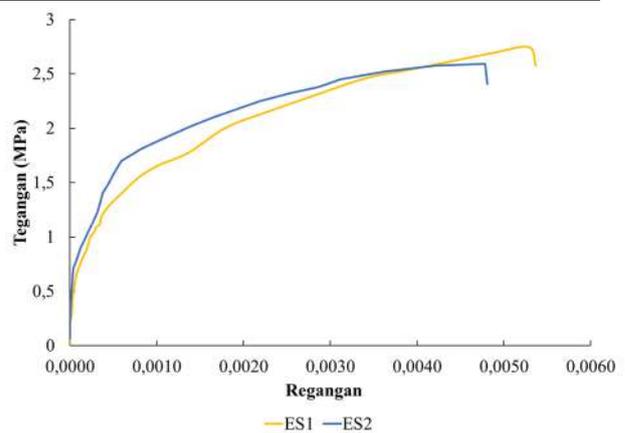
Kode sampel	% Tegangan maksimum	Beban (kN)	$V_{uncracked}$ (km/s)	$V_{cracked}$ (km/s)	$E_{duncracked}$ (MPa)	$E_{dcracked}$ (MPa)	% Penurunan E_d	% Sisa E_d
ED1		30.50	3.46	1.48	24648.70	4291.20	82.59	17.41
ED2	100	28.50	3.47	1.78	24859.10	6316.48	74.59	25.41
ED3		30.50	3.45	1.00	24487.87	1784.42	92.71	7.29
ED4		22.50	3.44	2.83	23826.90	15970.17	32.97	67.03
ED5	75	22.50	3.47	2.79	24621.87	15925.11	35.32	64.68
ED6		22.50	3.43	2.84	23968.40	16211.95	32.36	67.64
ED7		15.00	3.42	3.19	23487.08	20648.60	12.09	87.91
ED8	50	15.00	3.35	3.05	22571.68	18711.57	17.10	82.90
ED9		15.00	3.35	2.97	22993.29	17782.15	22.66	77.34
ED10		9.00	3.30	3.21	22319.96	21141.12	5.28	94.72
ED11	30	9.00	3.37	3.23	23237.18	21244.98	8.57	91.43
ED12		9.00	3.52	3.42	25714.20	24113.02	6.23	93.77

deformasi yang berlebihan hingga terjadi perubahan bentuk permanen dan menimbulkan retak. Penurunan modulus elastisitas dinamis terjadi sangat drastis hingga mencapai 83.30% ketika timbul kerusakan parah pada sampel yang mengalami tegangan maksimum.

Dalam berbagai pedoman desain struktur perkerasan seperti MDPJ (2017), ASTHOO (2008), dan FAA (2018) menggunakan modulus elastisitas statik (E_s) sebagai *input* dalam analisisnya. Maka dari itu, pada penelitian ini dilakukan perhitungan nilai modulus elastisitas statik yang melibatkan hasil pengukuran tegangan dan regangan pada sampel silinder CTB, serta *trend* perubahan modulus elastisitas dinamik yang diperoleh dari pengujian UPV seperti yang disajikan pada **Gambar 11** atau

Tabel 4. Pengukuran tegangan dan regangan dilakukan pada sampel silinder CTB berukuran 150×300 mm sebanyak 2 sampel, yaitu sampel ES1 dan ES2. Dari hasil pengukuran tegangan dan regangan akibat tekanan pada sampel tersebut, diperoleh grafik hubungan antara tegangan dan regangan seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 12**.

Berdasarkan grafik pada **Gambar 12**, diperoleh nilai modulus elastisitas statik pada sampel ES1 dan sampel ES2 masing-masing adalah 2067.26 MPa dan 1938.90 MPa. Nilai tersebut merupakan nilai modulus elastisitas statik sampel CTB yang masih utuh/tidak retak (*uncracked*). Untuk nilai modulus elastisitas statik pada sampel CTB yang retak (*cracked*) dihitung dengan mengacu pada persentase penurunan modulus elastisitas dinamik. Adapun hasil



perhitungan nilai modulus elastisitas statik CTB disajikan pada **Tabel 5**.

CQD (%)	Penurunan modulus elastisitas dinamik (%)	Modulus elastisitas statik CTB <i>uncracked</i> (MPa)	Modulus elastisitas statik CTB <i>cracked</i> (MPa)
-	-	2003	-
94.13	6.69	-	1868.92
83.73	17.28	-	1656.81
68.00	33.55	-	1330.95
4.71	83.30	-	334.54

Gambar 12. Grafik hubungan tegangan dan regangan sampel silinder CTB 150×300 mm**Tabel 5.** Hasil perhitungan modulus elastisitas statik berdasarkan *trend* penurunan modulus elastisitas dinamik

Seperti yang terlihat pada **Tabel 5**, nilai modulus elastisitas statik CTB yang tidak retak (*uncracked*) sebesar 2003 MPa merupakan hasil dari rata-rata nilai modulus elastisitas statik pada sampel ES 1 dan ES 2. Penurunan nilai modulus elastisitas statik CTB yang retak (*retak*) diperoleh dari persentase penurunan modulus elastisitas dinamik dikalikan dengan nilai modulus elastisitas statik CTB tidak retak (*uncracked*). Maka dari itu, *trend* penurunan nilai modulus elastisitas statik CTB mengikuti *trend* penurunan modulus elastisitas dinamik. Berdasarkan hasil perhitungan, dapat dilihat bahwa CTB dengan indeks kualitas 4.71% atau yang mengalami derajat kerusakan 95.29% memiliki nilai modulus elastisitas statik sebesar 334.54 MPa. Nilai modulus elastisitas statik CTB yang retak tersebut masuk ke dalam rentang nilai *resilient modulus* material granular tak terikat (*unbound*) sebesar 61.77 – 366.68 MPa [27]. *Resilient modulus* merupakan representasi dari modulus elastis pada material granular tak terikat [28].

4. Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Terdapat peningkatan derajat kerusakan seiring dengan bertambahnya tegangan yang dialami oleh CTB. Derajat kerusakan meningkat sangat signifikan hingga mencapai 95.29% ketika CTB mengalami tegangan maksimum.
- Derajat kerusakan sangat berpengaruh terhadap nilai modulus elastisitas material CTB, dimana semakin tinggi derajat kerusakan yang dialami oleh CTB, maka semakin rendah nilai modulus elastisitas material.
- Nilai modulus elastisitas material menurun secara drastis hingga 83.30% ketika derajat kerusakan CTB mencapai 95.29%.
- CTB yang mengalami derajat kerusakan 95.29% memiliki nilai modulus elastisitas yang sama seperti material granular tak terikat (*unbound*).

Berdasarkan analisis hasil penelitian ditemukan ketidakcocokan nilai referensi dalam *concrete quality designation* (CQD) yang digunakan untuk menghitung indeks kualitas pada CTB yang mengalami kerusakan parah, sehingga disarankan adanya studi lebih lanjut mengenai hal tersebut. Selain itu, disarankan adanya studi lebih lanjut mengenai derajat kerusakan dan perubahan modulus elastisitas berdasarkan variasi kadar semen pada campuran CTB. Pengukuran tegangan dan regangan melalui *unconfined compressive strength test* serta pengukuran kecepatan gelombang melalui *ultrasonic pulse velocity test* sebaiknya dilakukan pada sampel silinder CTB dengan ukuran yang sama, agar diperoleh hubungan modulus

elastisitas dinamik dan modulus elastisitas statik pada material CTB.

Daftar Pustaka

- [1] H. C. Hardiyatmo, *Perancangan Perkerasan Jalan & Penyelidikan Tanah*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press, 2015.
- [2] B. G. E. Halsted, D. R. Luhr, and W. S. Adaska, "Guide to Cement-Treated Base (CTB)." Portland Cement Association (PCA), Illinois, 2006.
- [3] A. Ismail *et al.*, "Laboratory investigation on the strength characteristics of cement-treated base," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 507, pp. 353–360, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.507.353.
- [4] K. Nusit, P. Jitsangiam, J. Kodikara, and H. Bui, "Cyclic Loading Responses of Cement-Stabilised Base Material: An Investigation on Moduli for Pavement Design," in *The 12 Australia New Zealand Conference on Geomechanics*, 2015, no. February.
- [5] S. Lim and D. G. Zollinger, "Estimation of the Compressive Strength and Modulus of Elasticity of Cement-Treated Aggregate Base Materials," *Transp. Res. Rec.*, vol. 1837, pp. 30–38, 2003.
- [6] K. P. George, "Cracking in Cement-Treated Bases and Means for Minimizing It," *47th Annu. Meet. Highw. Res. Board*, pp. 59–71, 1968.
- [7] P. E. Fossberg, J. K. Mitchell, and C. L. Monismith, "Cracking and Edge-Loading Effects on Stresses and Deflections in a Soil-Cement Pavement," *Highw. Res. Rec.*, 1972.
- [8] A. Sountharajah, H. H. Bui, N. Nguyen, P. Jitsangiam, and J. Kodikara, "Early-Age Fatigue Damage Assessment of Cement-Treated Bases under Repetitive Heavy Traffic Loading," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 30, no. 6, 2018, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002250.
- [9] K. Nusit and P. Jitsangiam, "Damage Behavior of Cement-Treated Base Material," *Procedia Eng.*, vol. 143, no. 1, pp. 161–169, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.021.
- [10] W. Uddin, R. M. Hackett, A. Joseph, Z. Pan, and A. B. Crawley, "Three-dimensional finite-element analysis of jointed concrete pavement with discontinuities," *Transp. Res. Rec.*, no. 1482, pp. 26–32, 1995.
- [11] A. M. Zainuri, *Kekuatan bahan*. Yogyakarta: Penerbit Andi, 2008.
- [12] T. F. Fwa, *The Handbook of Highway Engineering*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group,

- 2006.
- [13] FAA, "AC 150/5370-10H, Standard Specifications for Construction of Airports," 2018.
- [14] T. H. Panzera, A. L. Christoforo, F. de Paiva Cota, P. H. Ribeiro Borges, and C. R. Bowen, "Ultrasonic Pulse Velocity Evaluation of Cementitious Materials," *Adv. Compos. Mater. - Anal. Nat. Man-Made Mater.*, no. May 2014, 2011, doi: 10.5772/17167.
- [15] B. Bolborea, C. Baera, S. Dan, A. Gruin, D. D. Burduhos-Nergis, and V. Vasile, "Concrete compressive strength by means of ultrasonic pulse velocity and moduli of elasticity," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 22, pp. 1–16, 2021, doi: 10.3390/ma14227018.
- [16] W. de A. Thomaz, D. Y. Miyaji, and E. Possan, "Comparative study of dynamic and static Young's modulus of concrete containing basaltic aggregates," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 15, no. June, p. e00645, 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00645.
- [17] F. Saint-Pierre, A. Philibert, B. Giroux, and P. Rivard, "Concrete Quality Designation based on Ultrasonic Pulse Velocity," *Constr. Build. Mater.*, vol. 125, pp. 1022–1027, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.158.
- [18] PCA, "Soil Cement Laboratory Handbook," *Portland Cement Association*. Portland Cement Association (PCA), Illinois, 1992.
- [19] SNI1743:2008, "Cara Uji Kepadatan Berat Untuk Tanah." Badan Standardisasi Nasional Indonesia, Jakarta, 2008.
- [20] ASTM D1633, "Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders." American Society for Testing and Material (ASTM) International, 2000, doi: American Standard Testing Methods.
- [21] SNI 8141:2015, "Spesifikasi lapis pondasi agregat semen (LFAS)." Badan Standardisasi Nasional Indonesia, Jakarta.
- [22] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concrete : Microstructure, Properties, and Materials*, Third. McGraw-Hill Companies, 2006.
- [23] ACI, "Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures," Farmington Hills, MI, USA, 2013. doi: 10.14359/51686889.
- [24] ASTM C597-02, "Standard test Method For Pulse Velocity Through Concrete." American Society for Testing and Material (ASTM) International, West Conshohocken, PA, U.S., 2002.
- [25] Direktorat Jenderal Bina Marga, *Manual Desain Perkerasan Jalan*. 2017.
- [26] ASTM C469-10, "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression." 2010.
- [27] S. Amirkhanian and M. Corley, "Characterization of Bases and Subbases for AASHTO ME Pavement Design," no. FHWA-SC-21-01, p. 149, 2021.
- [28] M. Ba, M. Fall, and J. Tinjum, "Comparison of Laboratory Resilient Modulus with Elastic Moduli measured with Soil Stiffness Gauge and Back-Calculated from Large Scale Model Experiment of Unbound Base Course," *Int. Conf. - Innov. Constr.*, no. May, 2015.