



Evaluasi dan Analisis Struktur Beton pada Jembatan Kalikuto di Ruas Jalan Tol Batang Semarang

Bobby Rio Indriyantho^{1,2*}, Aries Susanty¹, Sumardi¹, Nuroji²

¹Program Studi Program Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang

²Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang

^{*}bobbyrio@live.undip.ac.id

Received: 28 Mei 2023 Revised: 21 Agustus 2023 Accepted: 15 September 2023

Abstract

The structural strength of a bridge is critical for the safety and security of road users, particularly on toll roads. The existing concrete structure must be evaluated on a regular basis as part of the bridge's health inspection. The concrete structure of the Kalikuto Bridge, which is part of the Batang Semarang Toll Road, is evaluated and analyzed in this study. The combination of destructive and non-destructive tests (DT and NDT), such as mapping concrete strength using a core drill and hammer test, concrete density with Ultrasonic Pulse Velocity (UPV), and reinforcement configuration using a rebar scanner. Meanwhile, the carbonation and corrosion of concrete materials were also evaluated. The finite element method software was used to analyze the concrete tensile strength against anchor pullout. Overall, the structural condition of the Kalikuto Bridge is still very good for land transportation routes until the building's design service life, i.e. compressive strength according to specifications, concrete density about 4356.67 – 5275.33 m/s, rebar configuration according to as built drawing, no carbonation and no corrosion in more than 90% of the structure. Anchor pullout will not occur since the tensile force does not exceed simulation results. Periodic maintenance is required to protect the bridge structure from things that can reduce the concrete strength.

Keywords: Kalikuto bridge, core drill, hammer test, UPV, rebar scanner

Abstrak

Kekuatan struktur suatu jembatan menjadi faktor yang sangat penting untuk keamanan dan keselamatan pengendara terutama di ruas jalan tol. Pemeriksaan secara berkala terhadap kesehatan bangunan jembatan perlu dilakukan, salah satunya evaluasi terhadap struktur beton eksisting. Penelitian ini mengevaluasi dan menganalisis struktur beton pada Jembatan Kalikuto yang merupakan bagian dari Jalan Tol Batang Semarang. Kombinasi dari destructive dan non-destructive test (DT dan NDT) seperti pemetaan kekuatan beton menggunakan core drill dan hammer test, kualitas kepadatan beton menggunakan Ultrasonic Pulse Velocity (UPV), serta konfigurasi tulangan di dalam beton menggunakan rebar scanner. Sementara itu, karbonasi dan korosi terhadap material beton juga dilakukan evaluasi. Kekuatan tarik beton terhadap cabut angkur juga dianalisis menggunakan software metode elemen hingga. Secara keseluruhan, kondisi struktur Jembatan Kalikuto masih sangat baik dioperasikan untuk jalur transportasi darat hingga masa layan bangunan rencana, yaitu kuat tekan sesuai dengan spesifikasi, kepadatan beton berkisar antara 4356,67 – 5275,33 m/s, konfigurasi tulangan sesuai dengan as built drawing, tidak terjadi karbonasi dan lebih 90% struktur tidak menunjukkan indikasi korosi. Cabut angkur diprediksi tidak akan terjadi karena gaya tarik tidak melampaui hasil simulasi. Perawatan secara berkala diperlukan untuk menghindari struktur jembatan dari hal-hal yang dapat menurunkan kekuatannya.

Kata kunci: Jembatan kalikuto, core drill, hammer test, UPV, rebar scanner

Pendahuluan

Jalan tol merupakan jalan yang dibangun agar dapat mempersingkat waktu tempuh dalam

berkendara roda empat atau lebih. Keamanan dan kenyamanan sangat diperlukan bagi para pengendara, sehingga setiap ruas jalan tol baik jalan maupun jembatan perlu perhatian maksimal

oleh pengelola. Bentuk perhatian tersebut dapat berupa pemeliharaan, perawatan atau perbaikan yang rutin dilakukan. Secara geometri, jalan tol dibangun di atas bidang tanah yang membentang antar daerah, di mana setiap daerah mempunyai karakter tanah asli yang berbeda-beda. Ada tanah asli yang harus dipotong dan ditimbun (*cut and fill*) atau cukup dilakukan timbunan dengan urugan pilihan kemudian dilakukan pemadatan.

Jembatan tol merupakan salah satu infrastruktur penting dari kekayaan nasional di sebagian besar negara di dunia karena mereka memainkan peran penting dalam menyediakan jalur transportasi melalui hambatan fisik seperti sungai, lembah atau persimpangan jalan (Xiang *et al.*, 2019). Jembatan tol biasanya terdiri dari kombinasi baja dan beton (komposit) yang mengalami aksi dinamik akibat dari beban kendaraan yang melintas di atas perkerasan jalan (Leitão *et al.*, 2011). Beban dinamik ini dapat menghasilkan inisiasi fraktur atau bahkan penyebaran retak pada struktur jembatannya. Bergantung pada besaran dan intensitasnya, hal ini dapat mengganggu sistem struktur yang juga dapat menyebabkan pengurangan masa layan jembatan yang direncanakan.

Pelengkung adalah salah satu bentuk jembatan yang pada awalnya dibangun dengan menggunakan material utama batu alam pada zaman Roma dan Cina kuno (Zhou *et al.*, 2016). Saat ini, jembatan pelengkung telah dikembangkan dalam beragam bentuk struktural dengan keunggulan kekakuan tinggi, kapasitas bentang lebar, biaya ekonomis, dan pemodelan struktur yang indah (Brozzetti, 2000). Di antara berbagai jenis jembatan pelengkung, jembatan pelengkung beton banyak dibangun dalam kondisi geologis yang baik dengan bentang kurang dari 200 m karena berat sendiri yang tinggi dan konstruksi yang sulit (Chen *et al.*, 2017; Tibaldo *et al.*, 2021). Dibandingkan dengan jembatan pelengkung beton, jembatan pelengkung baja banyak digunakan untuk jembatan bentang panjang karena kekuatan baja yang tinggi dan beban mati yang lebih sedikit tetapi stabilitas meningkat (Chen *et al.*, 2011). Oleh karena itu, penerapan struktur komposit baja-beton merupakan solusi tepat untuk memadukan keunggulan kedua material tersebut (Wei *et al.*, 2014), sehingga sampai saat ini banyak dikembangkan berbagai jenis struktur pelengkung sesuai dengan penggunaannya (Salonga dan Gauvreau, 2014; Shao *et al.*, 2021). Jembatan-jembatan di Indonesia telah banyak menggunakan pelengkung dengan kombinasi material baja dan beton tersebut, salah satunya Jembatan Kalikuto yang merupakan ruas dari Jalan Tol Batang Semarang (Gambar 1).



Gambar 1. Jembatan Kalikuto di ruas Jalan Tol Batang Semarang

Struktur bawah Jembatan Kalikuto menggunakan tiang pancang dengan kedalaman yang bervariasi tergantung pada kondisi tanah asli. Struktur atas berupa girder atau gelagar, baik berupa gelagar dari beton (*prestress*) atau gelagar baja. Bagian perkerasan jalan tol dapat berupa *composite pavement* yaitu gabungan antara beton (*rigid pavement*) pada bagian dasar dan aspal (*flexible pavement*) pada bagian atas atau hanya salah satunya. Keamanan dan kenyamanan berkendara saat memasuki area jembatan atau pindah trase dari jalan raya ke jembatan juga perlu diperhatikan. Penghubung pindah trase atau jalan pendekat (*oprit*) secara geometri dan elevasi berperan penting memberikan rasa aman dan nyaman tersebut.

Banyak aspek yang perlu diperhatikan oleh pengelola dalam memberikan pelayanan maksimal bagi pengguna jalan tol. Salah satu aspek yang menjadi agenda penting difokuskan untuk melaksanakan observasi, evaluasi dan kajian struktur pada jembatan-jembatan yang membentang sepanjang Jalan Tol Batang Semarang. Salah satu jembatan yang saat ini dilakukan kajian struktur tersebut adalah Jembatan Kalikuto yang berada di atas Sungai Kuto Kecamatan Weleri Kabupaten Kendal Provinsi Jawa Tengah dan merupakan jembatan pelengkung dengan kombinasi material beton dan baja (komposit). Penelitian ini bertujuan untuk memeriksa kekuatan struktur jembatan pada masa layan secara berkala. Kajian struktur ini hanya berfokus pada material beton Jembatan Kalikuto menggunakan pengujian yang sifatnya merusak (*destructive test/DT*) dan pengujian yang bersifat tidak merusak (*non-destructive test/NDT*).

Metode

Bahan kajian yang digunakan dalam penelitian ini adalah material beton eksisting yang terpasang pada struktur Jembatan Kalikuto menggunakan DT

dan NDT. DT di sini dikategorikan sebagai *semi-destructive* karena hanya mengambil sebagian kecil dari struktur di lokasi yang tidak menurunkan kekuatan dan membahayakan struktur tersebut. Semi DT yang dilakukan dalam kajian ini menggunakan metode *core drill* pada material beton struktur jembatan. ASTM C42/C42M-04 dan ACI 214.4R-03 maupun SNI 03-2492-2002 telah mengatur tata cara pengambilan sampel *core* beton dengan pengeboran. Sampel beton yang telah diambil tersebut, kemudian diuji tekan dengan alat uji tekan (*compression apparatus*) di laboratorium untuk mendapatkan kuat tekan beton eksisting. Tentunya, pengambilan sampel tersebut dilakukan oleh laboran berpengalaman dan menggunakan alat pelindung diri (APD) (Gambar 2).



Gambar 2. Pengambilan sampel *core drill* beton

Sementara itu, NDT dilakukan menggunakan peralatan laboratorium digital yang sama sekali tidak akan mengakibatkan kerusakan pada struktur sekecil pun. Jenis NDT yang digunakan dalam penelitian ini meliputi pemetaan mutu beton menggunakan alat *Hammer test*, pemeriksaan kepadatan beton melalui alat *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) dan pengecekan konfigurasi tulangan baja dalam beton dengan alat *rebar scanner/detector*. Pemetaan mutu atau kekuatan beton dilakukan pada lokasi *abutment* dan angkur jembatan (Gambar 3), sedangkan pemeriksaan kepadatan beton yang juga pada lokasi angkur diperlihatkan pada Gambar 4. Sementara itu, pemeriksaan konfigurasi tulangan baja dalam beton dilakukan pada lokasi *abutment* jembatan (Gambar 5). Berdasarkan dokumentasi tersebut, semua kegiatan dikerjakan dengan mengutamakan K3L di lapangan.

Pemetaan kekuatan beton dengan menggunakan alat *Hammer test* dilakukan berdasarkan ASTM C805-02 dan SNI 03-4430-1997, sedangkan penggunaan alat UPV untuk memeriksa kepadatan dan homogenitas beton sesuai dengan ASTM C597-02. Sementara itu, ASTM A615/A615M mengatur standar tulangan baja yang tertanam

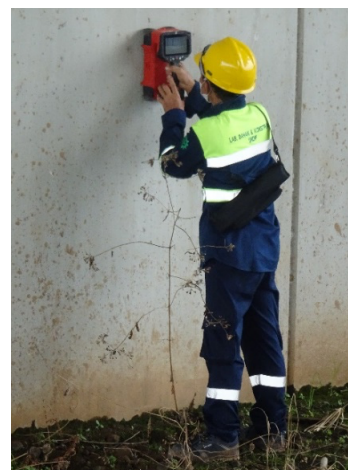
dalam beton. Semua aktivitas uji material beton dilakukan berdasarkan standar peraturan sehingga etika profesi keinsinyuran telah diterapkan pada pekerjaan tersebut yang tentunya merupakan kewajiban semua insinyur pada bidang keilmuannya masing-masing.



Gambar 3. Pemetaan kekuatan beton dengan alat *Hammer test*



Gambar 4. Pemeriksaan kepadatan beton dengan alat *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)



Gambar 5. Deteksi konfigurasi tulangan dalam beton dengan alat *rebar scanner*

Selain uji kuat tekan, sampel hasil *core drill* juga diuji karbonasi. Karbonasi adalah proses reaksi antara CO_2 yang terkandung dalam udara dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang terkandung dalam beton. Uji karbonasi dilakukan dengan penyemprotan 5% *phenolphthalein* yang dilarutkan dalam alkohol pada beton hasil *core drill* diameter 1 inch (EN 12390-12:2020). Beton yang belum mengalami karbonasi akan berwarna ungu jika disemprot dengan larutan tersebut (Gambar 6). Sementara itu, beton yang sudah mengalami karbonasi tidak akan berubah warna jika terkena larutan tersebut.



Gambar 6. Uji karbonasi pada sampel *core drill* beton

Pada penelitian ini, uji korosi berdasarkan ASTM C876 juga dilakukan yang bertujuan untuk memetakan tingkat korosi besi tulangan yang berada di dalam beton (Gambar 7). Pengukuran dilakukan berdasarkan beda potensial tulangan di dalam beton relatif terhadap larutan referensi *half-cell* (larutan CuSO_4) pada permukaan beton. Pembacaan pengukuran sebagai indikasi telah terjadi korosi dilakukan dengan membaca potensial pada alat ukur voltmeter yang dihubungkan dengan baja tulangan (positif) dan permukaan beton yang dihubungkan dengan larutan referensi elektroda (negatif). Pembacaan tersebut dilakukan pada beberapa titik dalam lokasi yang berdekatan.



Gambar 7. Uji korosi beton pada *abutment* jembatan dekat posisi angkur

Analisis terhadap hasil pengukuran di lapangan dilakukan baik menggunakan alat uji di laboratorium maupun menggunakan komputer. Sampel *core drill* beton diuji menggunakan alat uji tekan (*compression apparatus*) untuk mengetahui kuat tekan beton eksisting. Sementara itu, hasil pengukuran lain akan diolah maupun diinterpretasi menggunakan software komputer. Untuk mengetahui kuat tarik beton dalam kasus cabut angkur, simulasi numerik dengan metode elemen hingga (*finite element method*) dilakukan menggunakan *software* DIANA FEA.

Hasil dan Pembahasan

Core drill beton

Pengujian kuat tekan sampel *core drill* dilakukan menggunakan *Computer Control Servo Hydraulic Concrete Compression Testing Machine*. Diameter (D) sampel *core drill* adalah 3 inch atau nominal terukurnya 70 mm. Sebelum dilakukan pengujian, benda uji dipotong dengan tinggi (L) 70 sampai 140 mm. Agar permukaan benda uji dapat rata pada saat pengujian tekan, maka digunakan *capping* dari belerang, baik pada permukaan atas maupun bawah.



Gambar 8. Sampel *core drill* sebelum diuji tekan



Gambar 9. Set up pengujian *core drill*

Sampel *core drill* sebelum dilakukan uji tekan ditunjukkan pada Gambar 8, *set up* pengujian tekan diperlihatkan pada Gambar 9 dan beton *core drill* pasca diuji tekan ditunjukkan pada Gambar 10. Perhitungan dari hasil pengujian menggunakan Persamaan 1.

$$\sigma = \left\{ \left(\frac{P}{A} \right) \cdot f_{L/D} \cdot f_{dia} \cdot f_d \right\} \quad (1)$$



Gambar 10. Sampel *core drill* setelah diuji tekan

Tabel 1. Faktor koreksi L/D

L/D	1,75	1,50	1,25	1,0
$f_{L/D}$	0,98	0,96	0,93	0,87

Tabel 2. Faktor koreksi diameter

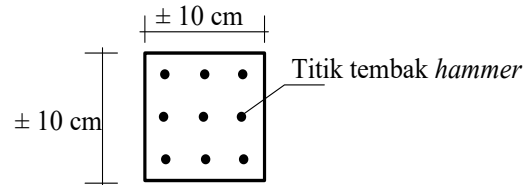
Diameter (mm)	50	100	150
f_{dia}	1,06	1,00	0,98

Pada persamaan tersebut, σ , P dan A masing-masing adalah kokoh tekan karakteristik (MPa), gaya tekan (N) dan luas bidang tekan (mm^2). Sisanya merupakan parameter untuk sampel *core drill* yaitu faktor koreksi L/D $f_{L/D}$, faktor koreksi diameter *core* f_{dia} dan faktor koreksi kerusakan akibat *drilling* f_d . Faktor koreksi L/D ditentukan berdasarkan ASTM C42/C42M-04 dan ACI 214.4R-03 (Tabel 1) dan faktor koreksi diameter diambil sesuai dengan ACI 214.4R-03 (Tabel 2). Dengan menggunakan Persamaan (1), kuat tekan sampel *core drill* adalah 22,14 MPa. Kuat tekan ini belum merepresentasikan kuat tekan jembatan secara keseluruhan karena sampel diambil di daerah sayap jembatan (*wingwall*) bagian selatan untuk mencegah kerusakan struktur utama.

Hammer test

Permukaan beton yang akan diuji dengan alat *Hammer test* dibersihkan terlebih dahulu dengan batu gerinda, sehingga permukaannya bersih dan rata. Ukuran bidang untuk pengujian $\pm 10 \times 10$ cm atau $\pm 15 \times 15$ cm (Gambar 11). Selanjutnya, permukaan beton “dipukul”, yaitu dengan menekan alat sehingga akan menghasilkan pantulan (*rebound*). Nilai *rebound* tersebut dibaca

pada skala yang tersedia (alat manual), tetapi jika menggunakan alat digital maka nilai *rebound* tersebut langsung terkonversi menjadi nilai mutu beton dengan satuan kg/cm^2 atau N/mm^2 (MPa). Untuk satu bidang uji (1 titik), pengujian dilakukan sebanyak 9 kali pukulan, kemudian nilai yang muncul dibaca pada alat. Semakin banyak bidang yang diuji maka akan semakin teliti penggambaran mutu beton di lokasi.



Gambar 11. Sketsa bidang uji *Hammer test*

Pemetaan kuat tekan beton dengan *Hammer test* dilakukan pada beton sebanyak 137 titik dengan sebaran lokasi, yaitu angkur timur sisi selatan, angkur barat sisi selatan, angkur barat sisi utara, angkur timur sisi utara, *abutment* timur dan barat, *abutment* oprit, serta sayap angkur utara dan selatan. Hasil pengukuran disajikan dalam Tabel 3 dengan memperlihatkan rata-rata kuat tekan beton pada sebaran titik-titik tersebut adalah sebesar 44,97 MPa.

Tabel 3. Hasil pemetaan kuat tekan beton dengan alat *hammer test*

Kuat tekan	Nilai (MPa)
Minimal	31,00
Maksimal	63,50
Rata-rata	44,97
Standar deviasi	8,69

Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

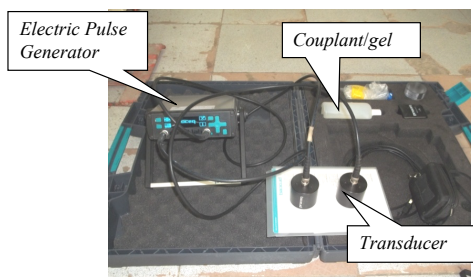
Pengujian menggunakan alat UPV ini meliputi tiga macam pekerjaan yaitu pemeriksaan kepadatan atau homogenitas beton pada struktur jembatan, pemeriksaan kepadatan beton pada sampel *core drill*, dan pengukuran kedalaman retak beton pada struktur jembatan. Pada pengujian untuk mengetahui kepadatan beton, nilai pengukuran dalam satuan kecepatan/*velocity* (m/s) sedangkan untuk kedalaman retak nilai pengukuran dalam satuan panjang (m). Klasifikasi kepadatan beton berdasarkan *velocity* diperlihatkan pada Tabel 4 (Agunwamba dan Adagba, 2012).

Peralatan yang dipakai yaitu *transducer* (satu pasang) terdiri *transmitter* dan *receiver*, *electric pulse generator*, *couplant* serta beberapa peralatan pendukung lainnya (Gambar 12). Permukaan beton yang akan diuji dibersihkan dari debu atau dihaluskan dengan batu gerinda secara pelan agar permukaan bidang uji bersih dan mengurangi pori

(void) di permukaan. Permukaan yang tidak rata dan berpori akan menjadi tempat udara bersembunyi, walaupun permukaan beton telah diberi *couplant*, udara akan terkurung di tempat tersebut. Gelombang ultrasonik merambat sangat lambat di udara sehingga sangat mempengaruhi hasil pengujian.

Tabel 4. Klasifikasi nilai kepadatan beton berdasarkan velocity (Agunwamba & Adagba, 2012)

Velocity (m/s)	Tingkat kepadatan beton
> 4570	Sangat bagus (<i>excellent</i>)
3660 – 4570	Bagus (<i>good</i>)
3050 – 3660	Sedang (<i>fair</i>)
2130 – 3050	Jelek (<i>poor</i>)
< 2130	Sangat jelek (<i>very poor</i>)

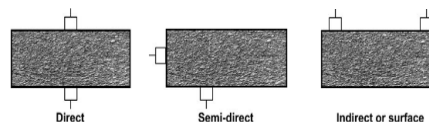


Gambar 12. Alat Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

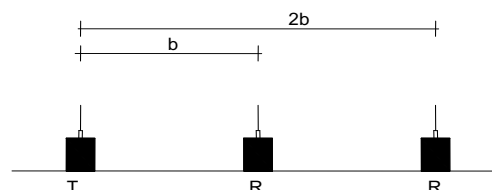
Metode pengujian ada tiga jenis yaitu *direct*, *semi-direct* dan *indirect* atau *surface velocity* seperti pada ilustrasi Gambar 13. Hanya metode *direct* dan *indirect* yang digunakan pada penelitian ini. Pengujian beton pada struktur jembatan dilaksanakan dengan metode *indirect* (*surface velocity*) yaitu pengujian pada elemen struktur beton dengan posisi *transmitter* (T) dan *receiver* (R) saling sejajar pada jarak tertentu. Jarak pertama disebut jarak *b* dan jarak kedua disebut jarak *2b*. Ilustrasi pengujian metode *indirect* ditunjukkan pada Gambar 14. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 5, di mana hampir semua lokasi pengujian menunjukkan hasil sangat bagus (*excellent*) berdasarkan tingkat kepadatan beton pada Tabel 4.

Selanjutnya, sampel *core drill* juga diuji kepadatannya menggunakan alat UPV. Pengujian dilaksanakan dengan metode *direct* yaitu pengujian pada elemen struktur beton dengan posisi *transmitter* (T) dan *receiver* (R) saling berhadapan pada jarak tertentu. Jarak antara dua *transducer* yang terpasang diukur sesuai dengan panjang sampel silinder *core drill*. Ilustrasi pengujian *direct* pada sampel *core drill* dilakukan pada tiga titik data (A1, A2 dan A3) seperti pada Gambar 15 dan pelaksanaannya pada Gambar 16. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 5, dimana

pengujian menunjukkan hasil bagus (*good*) berdasarkan tingkat kepadatan beton pada Tabel 4.



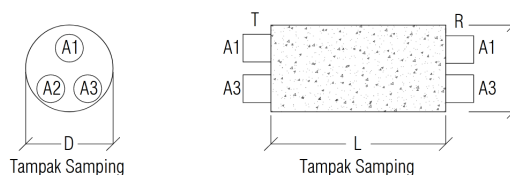
Gambar 13. Jenis pengujian UPV



Gambar 14. Metode indirect (surface velocity)

Tabel 5. Hasil pengujian UPV pada struktur jembatan

No	Lokasi	Velocity (m/s)	Klasifikasi Tabel 4
1	Angkur Timur sisi Selatan	4852,45	Sangat bagus (<i>excellent</i>)
2	Angkur Barat sisi Selatan	4902,67	Sangat bagus (<i>excellent</i>)
3	Angkur Barat sisi Utara	4655,56	Sangat bagus (<i>excellent</i>)
4	Angkur Timur sisi Utara	4976,78	Sangat bagus (<i>excellent</i>)
5	Abutment Timur (Selatan)	4577	Sangat bagus (<i>excellent</i>)
6	Abutment Timur (Tengah)	5275,33	Sangat bagus (<i>excellent</i>)
7	Abutment Timur (Utara)	4548,33	Bagus (<i>good</i>)
8	Abutment Barat (Utara)	4951	Sangat bagus (<i>excellent</i>)
9	Abutment Barat (Tengah)	4682	Sangat bagus (<i>excellent</i>)
10	Abutment Barat (Selatan)	5083,33	Sangat bagus (<i>excellent</i>)



Gambar 15. Ilustrasi pengujian direct pada sampel core drill dengan alat UPV

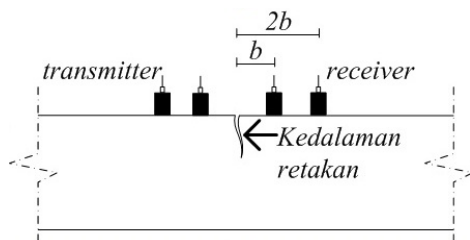
Tabel 6. Hasil pengujian UPV sampel pada core drill

No	Kode	Velocity (m/s)	Klasifikasi Tabel 4
1	Core-1	4485,33	Bagus (<i>good</i>)
2	Core-2	4356,67	Bagus (<i>good</i>)

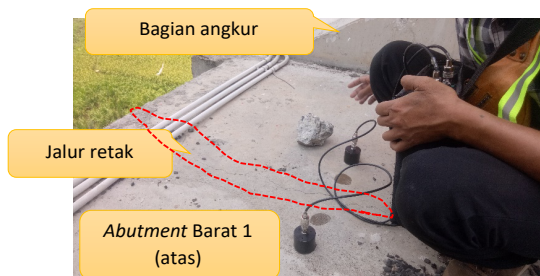


Gambar 16. Ilustrasi pengujian *direct* pada sampel *core drill* dengan alat UPV

Selanjutnya, pelaksanaan pengukuran kedalaman retak beton dilakukan *indirect* yaitu pengujian pada elemen struktur beton dengan posisi *transmitter* saling sejajar pada jarak tertentu dari garis tengah retakan. Jarak pertama dari garis tengah retakan disebut jarak b dan jarak kedua disebut jarak $2b$. Nilai ini akan digunakan untuk menghitung cepat rambat gelombang (*velocity*) yang diperoleh dari pembagian jarak antara dua *transducer* dengan waktu rambat gelombang (dihitung otomatis oleh alat). Pengukuran dilakukan sebanyak 3 titik berbeda pada bidang uji yang sudah ditentukan. Ilustrasi pengukuran kedalaman retak ditunjukkan seperti pada Gambar 17, sedangkan pelaksanaan pengukuran kedalaman retak dengan UPV ditunjukkan pada Gambar 18.



Gambar 17. Ilustrasi pengukuran kedalaman retak



Gambar 18. Pengukuran kedalaman retak dengan UPV

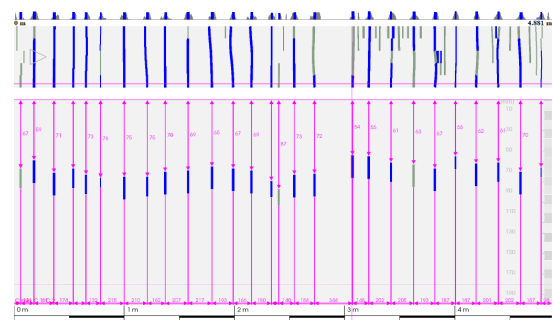
Tabel 7. Hasil pengujian UPV pada sampel *core drill*

No	Kode	Kedalaman retak (m)
1	Angkur Timur sisi Selatan	0,044
2	Angkur Barat sisi Selatan	0,033
3	Angkur Barat sisi Utara	0,031
4	Angkur Timur sisi Utara	0,033

Hasil pengukuran kedalaman retak pada lokasi *abutment* bagian atas yang berdekatan dengan sisi angkur seperti pada Tabel 7. Kedalaman retak yang telah terjadi paling besar atau maksimum pada saat dilakukan pengamatan adalah rata-rata 0.044 m atau 44 mm di lokasi angkur timur sisi utara.

Konfigurasi Tulangan dengan *Rebar Scanner*

Penelitian konfigurasi tulangan terpasang di dalam struktur beton dilakukan dengan menggunakan alat *rebar scanner*. Alat tersebut bekerja berdasarkan gelombang elektromagnetik. Rambatan gelombang yang dipancarkan oleh alat pada bidang deteksi akan diterima kembali oleh alat berupa sinyal keberadaan tulangan baja. Dari deteksi atau *scanning* tersebut, perkiraan posisi dan spasi tulangan yang berada dalam beton dapat diketahui hanya pada lapis pertama atau yang terdekat dengan permukaan bidang alat. Dengan menjalankan alat sesuai bidang elemen, tulangan pokok dan tulangan sengkang akan dapat diidentifikasi. Kegiatan ini dilakukan terutama untuk meminimalkan terpotongnya tulangan baja pada saat pengambilan benda uji *core drill* dan mengetahui konfigurasi tulangan pada saat pelaksanaan penelitian kepadatan beton dengan alat UPV. Gambar 19 menunjukkan hasil visualisasi data *rebar scanning*.



Gambar 19. Deteksi konfigurasi tulangan *abutment* bagian bawah (tulangan vertikal)

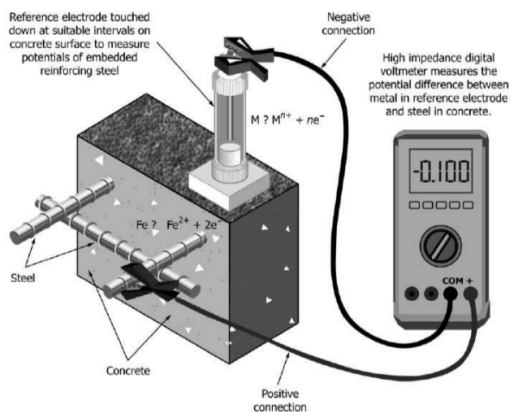
Karbonasi

Sampel *core drill* yang dilakukan pengujian karbonasi diperlihatkan pada Gambar 6. Hasil pengamatan karbonasi menunjukkan bahwa sampel uji belum menunjukkan adanya indikasi telah mengalami karbonasi. Atau pada saat pengamatan, bagian yang pucat belum terlihat secara jelas.

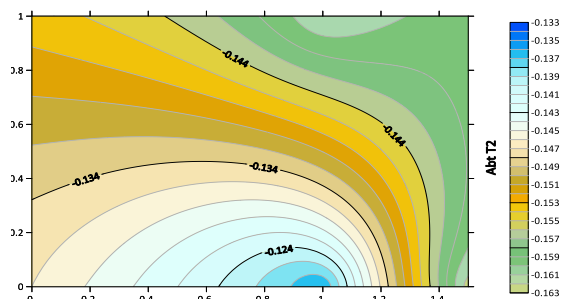
Korosi beton dengan *half-cell*

Pengujian korosi pada beton diilustrasikan pada Gambar 20 berdasarkan ASTM C876. Pembacaan pengukuran dan pencatatan beda potensial yang

terbaca pada alat dilakukan dengan ketentuan hasil pengukuran sesuai dengan Tabel 8. Hasil pengujian korosi pada lokasi *abutment* atas yang berdekatan dengan angkur dan pada bagian tepi badan jalan dapat diilustrasikan dalam bentuk peta kontur sederhana sebagai *mapping* penyebaran potensialnya seperti yang diperlihatkan pada Gambar 21.



Gambar 20. Ilustrasi pengujian korosi (ASTM C876)



Gambar 21. Contoh peta kontur korosi pada bagian *abutment* dekat angkur

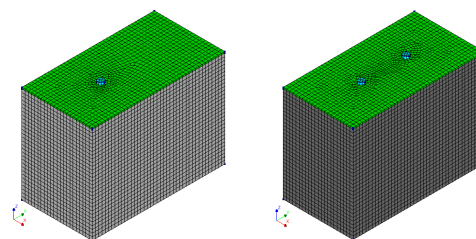
Dari hasil pengamatan kontur, potensi korosi pada struktur beton Jembatan Kalikuto yaitu 90% atau lebih tidak terjadi korosi pada saat pengukuran, karena seluruh beda potensialnya tercatat lebih dari -0,200 volt. Beda potensial yang tercatat berkisar antara -0,163 volt (warna hijau) hingga -0,133 volt (warna biru), sehingga semua nilai kontur tidak mencapai -0,200 volt.

Tabel 8. Potensial dan pembacaan korosi menurut panduan alat

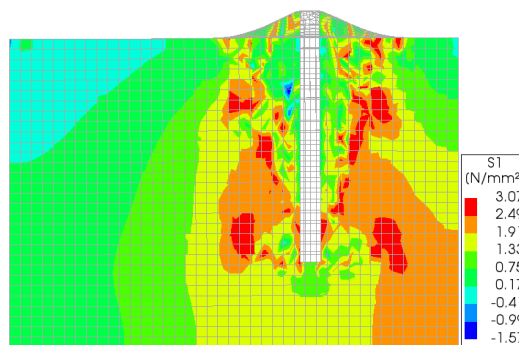
No	Potensial (volt)	Arti pembacaan
1	> -0,200	90% atau lebih tidak terjadi korosi pada saat pengukuran
2	-0,200 hingga -0,350	Dianggap <i>inconclusive</i> (kecil sekali)
3	< -0,350	90% menunjukkan terjadinya korosi aktif pada area yang diukur

Simulasi cabut angkur

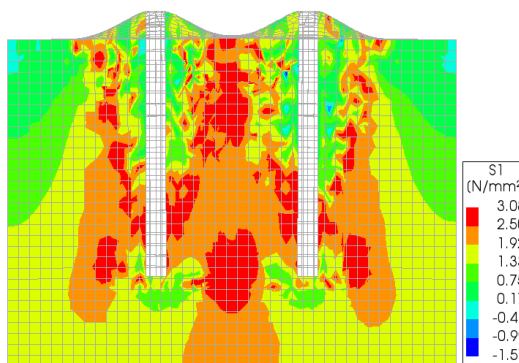
Analisis cabut angkur pada kajian ini dilakukan dengan simulasi numerik menggunakan *software* DIANA FEA versi 10.3 berbasis metode elemen hingga (*finite element method*). Cabut angkur dalam analisis ini dimodelkan menggunakan elemen solid tiga dimensi (3D *solid element*) yang melibatkan dua jenis material, yaitu beton (pada blok beton) dan baja (pada angkur dan *base plate* angkur). Permodelan ini menggunakan 1 buah angkur (*single anchor*) yang merepresentasikan posisi angkur di tepi pelat (posisi satu angkur yang jauh dari angkur lainnya) dan 2 buah angkur yang terletak di bagian tengah pelat (*double anchors*). Permodelan 2 buah angkur dilakukan karena distribusi tegangan beton pada blok beton yang terjadi di satu angkur mengalami *overlapping* dengan angkur sebelahnya (khusus bagian tengah pelat). Model diperlihatkan pada Gambar 22.



Gambar 22. Model 3D satu angkur dan dua angkur



Gambar 23. Distribusi tegangan ketika beban puncak 12179 kN (1 angkur)



Gambar 24. Distribusi tegangan ketika beban puncak 9013 kN (2 angkur)

Untuk menjalankan simulasi (*running*), *input* parameter material diperlukan pada model cabut angkur Jembatan Kalikuto tersebut. Dengan mengambil hasil *hammer test* di lapangan, kuat tekan beton eksisting pada blok beton adalah sebesar $f_c' = 32,86$ MPa. Angka ini digunakan untuk menghitung beberapa parameter material beton sebagai *input* berdasarkan SNI 2847-2019 dan *fib Model Code 2010* meliputi modulus elastisitas $E = 26942,11$ MPa, hubungan tegangan-regangan tekan beton, kuat tarik beton $f_t = 3,08$ MPa dan *fracture energy* $G_f = 0,137$ N/mm. Sementara itu, rasio Poisson ditentukan sebesar 0,2 untuk beton dan 0,3 untuk baja. Kuat leleh baja f_y diambil sebesar 420 MPa dengan modulus elastisitasnya $E_s = 200.000$ MPa.

Tabel 9. Hasil pengujian beton pada struktur Jembatan Kalikuto

No Pengujian	Hasil	Keterangan sesuai standar
1	Kuat tekan $22,14$ MPa	Sesuai dengan <i>as built drawing</i>
2	<i>Hammer test</i> $44,97$ MPa	Masih memenuhi spesifikasi
3	Kepadatan beton dengan UPV <i>Excellent dan good</i>	Min. $4356,67$ m/s Maks. $5275,33$ m/s
4	<i>Rebar scanner</i> Tulangan baja terpetakan secara jelas	Sesuai dengan <i>as built drawing</i>
5	Karbonasi Sampel <i>core drill</i> berwarna pink	Belum/tidak terjadi karbonasi
6	Korosi Potensial kontur $>-0,20$	90% atau lebih tidak terjadi korosi
7	Simulasi cabut angkur 12179 kN dan 9013 kN	Gaya yang terjadi tidak melampaui hasil simulasi

Beban tarik maksimum angkur baja terhadap blok beton adalah sekitar 12179 kN (*single anchor*) dan 9013 kN (*double anchors*). Adapun distribusi tegangan ketika beban puncak tercapai diperlihatkan pada Gambar 23 dan 24. Hasil analisis cabut angkur ini menunjukkan kapasitas angkur baja lebih kuat daripada kapasitas blok betonnya. Hal ini menjelaskan bahwa beban maksimum yang dapat diterima oleh beton lebih kecil daripada kapasitas leleh baja ketika terjadi tarik pada tumpuan. Dengan kata lain, tegangan maksimum angkur yang dapat terjadi ketika dalam kondisi tarik melampaui tegangan tarik ijin betonnya.

Kesimpulan

Penelitian struktur beton Jembatan Kalikuto pada ruas Jalan Tol Batang Semarang mencakup *destructive* dan *non-destructive test* (DT dan NDT). Untuk DT, pengambilan sampel *core drill* beton dilakukan pada bagian yang bukan merupakan struktur utama. Sementara itu, NDT pada penelitian ini meliputi pemetaan kuat tekan beton dengan *hammer test*, pemeriksaan kepadatan beton dengan UPV, dan pengecekan konfigurasi tulangan baja dalam beton dengan *rebar scanner*. Pengujian secara kimiawi yaitu karbonasi dan korosi juga dilakukan. Simulasi numerik dengan *software finite element method* dilakukan dalam pengujian kuat tarik beton dengan kasus cabut angkur. Secara keseluruhan, hasil dari pengujian memperlihatkan bahwa struktur Jembatan Kalikuto terutama pada material betonnya masih berfungsi sangat baik dan kuat dalam menerima beban rencana hingga masa layan jembatan tersebut (Tabel 9). Perawatan dan pengecekan kondisi struktur eksisting secara berkala dapat dilakukan untuk mencegah hal-hal yang tidak diinginkan terjadi pada jembatan tersebut.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih disampaikan kepada PT Jasamarga Semarang Batang yang telah mendanai penelitian ini, juga kepada tim Laboratorium Bahan dan Konstruksi serta tim Laboratorium Mekanika Tanah Departemen Teknik Sipil Universitas Diponegoro yang telah membantu dan mendukung pelaksanaan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- ACI 214.4R-03. Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results.
- Agunwamba, J. C. & Adagba, T. (2012). A comparative analysis of the rebound hammer and ultrasonic pulse velocity in testing concrete. *Nigerian Journal of Technology*, 31(1), 31–39.
- ASTM A615/A615M. Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement.
- ASTM C42/C42M-04. Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete.
- ASTM C597-02. Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete.

- ASTM C642-06. Standard Test Method of Density, Absorption, and Void's in Hardened Concrete.
- ASTM C 805-02. Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete.
- ASTM C876. Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.
- Brozzetti, J. (2000). Design development of steel-concrete composite bridges in France. *Journal of Constructional Steel Research*, 55, 229–243. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(99\)00087-5](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(99)00087-5).
- Chen, B., Chen, K., Nakamura, S., & Zhao, Q. (2011). A survey of steel arch bridges in China. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 5(9), 799–808. <https://doi.org/10.17265/1934-7359/2011.09.005>.
- Chen, B., Su, J., Lin, S., Chen, G., Zhuang, Y., & Tabatabai, H. (2017). Development and application of concrete arch bridges in China. *Journal of Asian Concrete Federation*, 3(1), 12–19. <https://doi.org/10.18702/acf.2017.06.3.1.12>.
- EN 12390-12:2020. Testing hardened concrete - Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete - Accelerated carbonation method.
- fib. (2010). Model Code for Concrete Structures. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn.
- Leitão, F. N., Da Silva, J. G. S., Da Vellasco, P. C. G. S., De Andrade, S. A. L., & De Lima, L. R. O. (2011). Composite (steel-concrete) highway bridge fatigue assessment. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(1), 14–24. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.07.013>.
- Salonga, J., & Gauvreau, P. (2014). Comparative Study of the Proportions, Form, and Efficiency of Concrete Arch Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 19(3), 04013010. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000537](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000537)
- Shao, X., He, G., Shen, X., Zhu, P., & Chen, Y. (2021). Conceptual design of 1000 m scale steel-UHPFRC composite truss arch bridge. *Engineering Structures*, 226, 111430. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111430>.
- SNI 03-2492-2002. Metode Pengambilan dan Pengujian Beton Inti. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 03-4430-1997. Metode Pengujian Elemen Struktur Beton dengan Alat Palu Beton Tipe N dan NR. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Tibaldo, G., Molner, L., Todisco, L., & Corres Peiretti, H. (2021). Comparative study of geometrical properties and simplified preliminary design procedure for concrete arch bridges. *Structural Concrete*, 22(5), 3074–3093. <https://doi.org/10.1002/suco.202100154>.
- Wei, J., Chen, B., & Wang, T.-L. (2014). Studies of in-plane ultimate loads of the steel truss web-RC composite arch. *Journal of Bridge Engineering*, 19(5), 04014006. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000576](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000576)
- Xiang, N., Goto, Y., Obata, M., & Alam, M. S. (2019). Passive seismic unseating prevention strategies implemented in highway bridges: A state-of-the-art review. *Engineering Structures* (194), 77–93. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.05.051>.
- Zhou, Z. B., Zhang, J., An, L., Zhang, X., & Tao, L. (2016). Spanning over 1400 years: China's remarkable Zhaozhou bridge. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, (pp. 1–7). London, UK: ICE Publishing.