

EVALUASI PEMERIKSAAN INTEGRITAS BETON PONDASI *BORED PILE* BERDASARKAN UJI PIT (PILE INTEGRITY TEST) DAN UJI CSL (CROSSHOLE SONIC LOGGING)

Ervina Yonamastuti¹, Mufti Astu Naufal², Hinawan Teguh Santoso³

^{1,2,3}Prodi Teknologi Konstruksi Jalan dan Jembatan, Politeknik Pekerjaan Umum
Jl. Prof. Soedharto, SH, Tembalang, Semarang

Email: ¹ervinayona@gmail.com, ²muftiastu@gmail.com, ¹hinawan.santoso@politeknikpu.ac.id

ABSTRACT

A bored pile is one type of deep foundation made by casting the concrete in situ according to the design depth. Quality control of concrete integrity in the bored pile is impossible to check visually because it is embedded in the borehole. Therefore, non-destructive test methods with Pile Integrity Test (PIT) and Crosshole Sonic Logging (CSL) are commonly used to obtain an overview of the concrete integrity of bored piles. The aim of the study was to determine the integrity of the concrete in the drilled foundation using the PIT and CSL methods by taking samples of 4 bored piles with a diameter of 1000 mm at the Besuk Kobo'an Bridge Replacement Package Project, Lumajang, East Java. Concrete integrity testing with PIT was carried out on 2 test piles, A15 with a depth of 20.70 m and B12 with a depth of 23.60 m. Concrete integrity testing with CSL was carried out on 2 test piles, A1 with a depth of 17.50 m, and B5 with a depth of 22.28 m. The results of the PIT test on the two test piles showed that the concrete integrity of the piles was included in the undamaged category with an impedance value (BTA) of 100%. Similarly, the results of the CSL test on the two test piles indicate that the concrete integrity of the piles is in the Good (G) category with a FAT value between 0 to 10% and an energy reduction of <6 dB. It can be concluded that all samples of drilled foundations tested for PIT and CSL have good concrete integrity. However, there were still some discrepancies in the implementation of the CSL test, including the number of access pipes used, materials of access pipe fittings, and testing time.

Keywords: bored pile, PIT, CSL, concrete integrity, foundation

ABSTRAK

Pondasi bor (*bored pile*) merupakan salah satu jenis pondasi dalam yang pembuatannya dilakukan dengan cor di tempat (*cast in-situ*) sesuai dengan kedalaman rencana. Kontrol mutu pekerjaan pengecoran pada pondasi bor berupa integritas beton tidak memungkinkan dilakukan secara visual karena tertanam di dalam lubang bor. Oleh karena itu, metode uji *non-destructive* dengan *Pile Integrity Test* (PIT) dan *Crosshole Sonic Logging* (CSL) lazim digunakan untuk mendapatkan gambaran integritas beton pondasi bor. Penelitian bertujuan untuk mengetahui integritas beton pada pondasi bor dengan metode PIT dan CSL dengan mengambil sampel 4 buah pondasi bor berdiameter 1000 mm pada Proyek Paket Penggantian Jembatan Besuk Kobo'an, Lumajang, Jawa Timur. Pengujian integritas beton dengan PIT dilakukan terhadap 2 buah tiang uji, yaitu A15 dengan kedalaman 20,70 m dan B12 dengan kedalaman 23,60 m. Adapun pengujian integritas beton dengan CSL dilakukan pada 2 buah tiang uji, yaitu A1 dengan kedalaman 17,50 m dan B5 dengan kedalaman 22,28 m. Hasil pengujian PIT pada kedua tiang uji menunjukkan bahwa integritas beton tiang tersebut masuk dalam kategori *undamage* dengan nilai impedansi (BTA) sebesar 100%. Untuk hasil pengujian CSL pada kedua tiang uji menunjukkan bahwa integritas beton tiang tersebut masuk dalam kategori *Good* (G) dengan nilai FAT antara 0 sampai 10% serta reduksi energi <6 dB. Dapat disimpulkan bahwa seluruh sampel pondasi bor yang dilakukan pengujian PIT dan CSL memiliki integritas beton yang baik. Namun demikian, masih ditemukan beberapa ketidaksesuaian dalam pelaksanaan uji CSL, yaitu jumlah dari pipa akses yang digunakan, bahan penyambung pipa akses, dan waktu pelaksanaan pengujian.

Kata kunci: *bored pile*, PIT, CSL, integritas beton, pondasi

1. PENDAHULUAN

Jembatan merupakan bangunan pelengkap jalan yang memiliki fungsi sebagai penghubung dua ujung jalan yang terputus oleh sungai, saluran, lembah dan selat atau laut, jalan raya, dan jalan kereta api (Puslitbang Jalan dan Jembatan, 2015). Pada tanggal 4 Desember 2021 telah terjadi keruntuhan Jembatan Besuk Kobo'an, Lumajang akibat banjir lahar dingin erupsi Gunung Semeru, sehingga menyebabkan jalur transportasi utama Kabupaten Lumajang dan Kabupaten Malang terputus. Pemerintah melalui Kementerian PUPR segera melakukan langkah untuk menyambungkan kembali akses transportasi yang terputus tersebut melalui Proyek Paket Penggantian Jembatan Besuk Kobo'an. Jembatan Besuk Kobo'an dirancang menggunakan bangunan atas dengan tipe *pratt truss* sepanjang 140.0 meter. Adapun bangunan bawah dirancang menggunakan pondasi bor (*bored pile*) dengan diameter 1.0 meter.

Menurut Bina Marga (2019), pondasi bor merupakan pondasi tiang yang pada tahap awal pengerjaannya dilakukan pengeboran tanah, lalu selanjutnya diberikan tulangan dan dicor dengan beton di dalamnya (Kementerian PUPR, 2019). Pelaksanaan pondasi jenis ini minimum getaran maupun suara sehingga tidak membahayakan bangunan sekitar, dengan kedalaman dan diameter tiang dapat divariasikan sesuai kebutuhan. Namun, pelaksanaan konstruksi pondasi bor dengan sistem cor di tempat (*cast in-situ*) perlu mendapatkan perhatian terkait dengan integritas (keutuhan) beton hasil pengecoran. Beton di dalam lubang bor tidak dapat diamati dan diperiksa langsung secara visual, sehingga diperlukan metode pengujian untuk membuktikan dan menjamin mutu hasil pelaksanaan pekerjaan beton pondasi.

Zhussupbekov, dkk (2019) melakukan pengujian integritas tiang bor dengan menggunakan dua metode uji *non-destructive*, yaitu *Crosshole Sonic Logging* (CSL) dan *Pile Integrity Test* (PIT). Hasil pengujian terhadap lebih dari 1500 pondasi bor, dimana 45% tiang diuji dengan CSL dan sisanya 55% diuji dengan PIT, ditemukan adanya 1 buah tiang yang mengalami kerusakan serius. Tulebekova (2021) melakukan perbandingan pengujian *non-destructive* terhadap pondasi bor dengan diameter 1.5 meter. Metode uji PIT digunakan terhadap 18 pondasi bor dengan hasil yang memuaskan dan uji CSL dilakukan pada 1 buah pondasi bor sedalam 53.1 m dengan hasil ditemukan adanya kerusakan beton pada kedalaman 22.6 - 24.6 m. Hartono, dkk (2021) melakukan kajian evaluasi keutuhan beton terhadap 17 buah pondasi bor berdiameter 2.0 m di Proyek Pembangunan Jembatan Pulau Balang II dengan menggunakan metode CSL, dimana ditemukan adanya 1 buah tiang yang mengalami anomali pada kedalaman 57.5 – 58.5 m.

Berdasarkan kajian di atas, masalah kerusakan (*defect*) pada beton masih sering ditemukan pada pekerjaan pondasi bor, sehingga uji integritas beton perlu dilakukan untuk mengontrol dan memastikan kualitas beton pondasi bor telah sesuai dengan desain. Uji integritas beton yang digunakan merupakan metode *non-destructive test*, diantaranya yaitu *Pile Integrity Test* (PIT) dan *Crosshole Sonic Logging* (CSL). PIT merupakan uji integritas menggunakan beban impak regangan rendah yang dapat memberikan gambaran kondisi integritas beton dan panjang tiang dalam waktu singkat. Adapun CSL merupakan uji yang dilakukan untuk mengetahui keseragaman material beton berdasarkan perbedaan kecepatan rambat gelombang ultrasonik. Luaran uji PIT didapatkan prediksi kedalaman dari kerusakan tiang bor, sedangkan dari uji CSL diperoleh perkiraan lokasi, jenis, dan luasan zona kerusakan (cacat). Cacat yang dimaksud adalah ketidakteraturan dari keutuhan beton akibat intrusi tanah, *necking*, *soft bottom*, segregasi, rongga dan cacat lainnya yang dapat mengakibatkan kinerja struktur pondasi menjadi buruk (Sarhan dan O'Neill, 2022). Kajian berfokus pada penerapan 2 (dua) metode *non-destructive test* untuk pemeriksaan integritas beton pondasi bor di Proyek Paket Penggantian Jembatan Besuk Kobo'an Lumajang, Jawa Timur. Prosedur pelaksanaan uji PIT dan CSL di lapangan akan dibandingkan terhadap standar rujukan. Integritas beton pondasi bor akan dievaluasi, dianalisis, dan dibahas berdasarkan luaran hasil uji PIT dan CSL. Akhir penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran prosedur pelaksanaan uji PIT dan CSL di lapangan, evaluasi hasil uji, serta kelebihan/kekurangan masing-masing metode uji.

2. TINJAUAN PUSTAKA

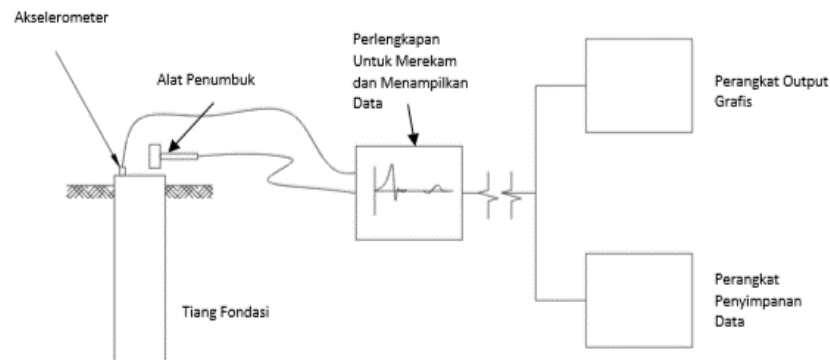
Pengujian *Pile Integrity Test* (PIT)

Pile Integrity Test (PIT) atau disebut juga *Sonic-Echo Pulse Integrity Test* merupakan pengujian yang dilakukan dengan memberikan gelombang tumbukan regangan rendah di kepala tiang lalu memantau respons gelombang tersebut (Kementerian PUPR, 2019). Pengujian ini dapat memeriksa adanya potensi kerusakan beton seperti rongga atau retakan, integritas tiang pada kedalaman total, dan menentukan panjang tiang pada pondasi bor.

Peralatan uji integritas tiang dengan metode PIT meliputi: (a) Palu genggam khusus, (b) Akselerometer presisi tinggi yang terhubung ke perangkat komputer yang dilengkapi dengan penyesuai, penguat, dan pendigitasian sinyal, dan (c) Alat perekam data (komputer). Peralatan uji PIT disajikan pada Gambar 1 dan skema pemasangan peralatan uji disajikan pada Gambar 2.



Gambar 1. Peralatan Pengujian *Pile Integrity Test* (Zhussupbekov, dkk, 2019)



Gambar 2. Skema Pemasangan Peralatan Pengujian PIT (Bina Marga, 2019)

ASTM (2007) memberikan langkah pengujian integritas tiang dengan PIT sesuai standar ASTM D-5882, yaitu:

(a) Persiapan

Untuk beton cor di tempat, pengujian dapat dilakukan minimal pada beton berusia 7 hari atau setelah mencapai kekuatan 75% dari kekuatan desain. Pastikan permukaan kepala tiang dapat diakses dan bersih dari tanah dan material lain. Jika diperlukan, gerinda permukaan tiang sehingga dihasilkan permukaan yang halus. Tempelkan sensor *accelerometer* pada daerah yang telah ditentukan jauh dari sisi kepala tiang. Untuk tiang berukuran >500 mm, minimum terdapat 3 lokasi penempelan sensor. Siapkan alat pemukul (palu pemukul) sehingga pukulan tegak lurus dengan tiang dan jarak dengan *accelerometer* tidak lebih dari 300 mm.

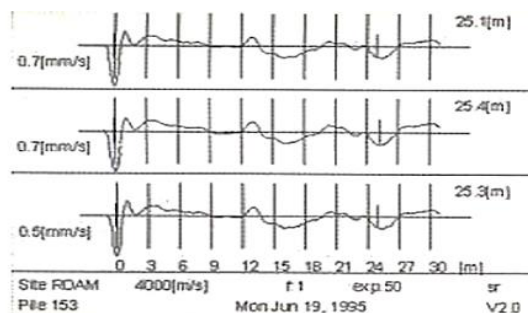
(b) Pencatatan

Data yang perlu dicatat saat pengujian diantaranya: (1) diameter dan panjang tiang, (2) tanggal pengecoran, (3) *as-built* geometri (volume beton, *casing permanent* atau sementara, besi tulangan), (4) data tanah, (5) lokasi *transducer*, serta (6) tanggal pengujian.

(c) Pengujian

Lakukan beberapa kali pukulan dan rekam setiap atau rata-rata pukulan. Selama pemukulan, monitor kecepatan dan gaya dari beberapa pukulan untuk didapatkan data yang konsisten. Data yang konsisten dipengaruhi oleh pukulan yang seragam, sistem *transducer* berfungsi dengan baik, sensor *accelerometer* terpasang dengan baik, dan perangkat komputer PIT berfungsi dengan baik.

Hasil dari pengujian PIT berupa grafik kecepatan terhadap panjang/kedalaman tiang yang ditampilkan pada monitor komputer, dimana panjang/kedalaman tiang tersebut berasal dari perkalian kecepatan gelombang tekan dengan waktu rambatnya. Adapun contoh bentuk grafik hasil pengujian PIT seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Hasil Uji PIT (Bina Marga, 2019)

Dasar analisis uji PIT adalah simpangan terjauh dari titik kesetimbangan perambatan gelombang tekan di sepanjang tiang, dimana:

- (a) Apabila sifat tanah, keseragaman material, dan ukuran penampang tiang tetap serta gelombang datang hanya dipantulkan saat mencapai dasar tiang, maka amplitudo gelombang tekan akan menurun terhadap kedalaman.

(b) Apabila tidak ada keseragaman material tiang, perubahan penampang, dan perubahan sifat kekerasan tanah, maka amplitudo gelombang tekan akan menurun secara tiba-tiba.

Hasil uji PIT dianalisis berdasarkan perubahan impedansi (BTA), yaitu perbandingan antara area bagian tiang yang terekam terhadap desain area tiang yang ditunjukkan dalam persentase (American Standard Testing and Material, 1979) seperti disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi Hasil Uji PIT Terhadap Perubahan Impedansi

<i>BTA (%)</i>	<i>Category</i>
100	<i>Undamaged – Pile in good condition</i>
80 – 99	<i>Slightly Damaged – Pile has a minor problem but is still tolerable.</i>
60 – 79	<i>Damage – Pile has significant problems; further analysis and repair needs</i>
Below 60	<i>Broken – Pile to be rejected.</i>

Sumber: ASTM, 1979

Secara umum, bentuk sinyal yang diperoleh dari hasil pengujian PIT diklasifikasikan sebagai berikut:

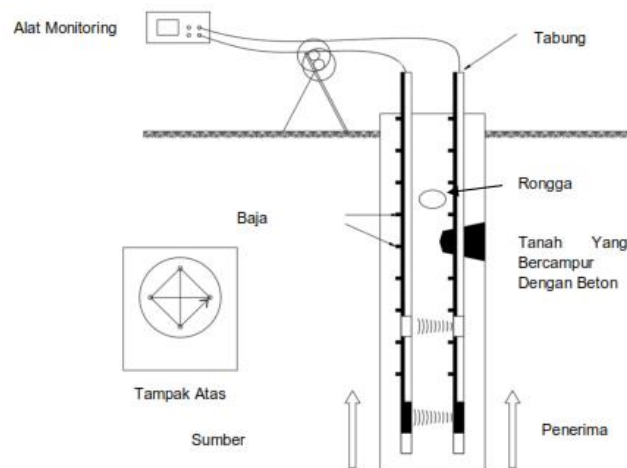
- (a) Apabila tiang yang diuji terlalu panjang dan/atau redaman tanah terlalu besar, maka tidak terdapat pantulan gelombang yang dihasilkan.
- (b) Terjadi perubahan besar akibat pantulan dari ujung tiang, perubahan penampang tiang atau perubahan lapisan tanah, maka gelombang yang dipantulkan hanya terjadi satu kali.
- (c) Dalam interval yang sama terdapat beberapa pantulan yang berulang. Hal ini mengindikasikan bahwa pada tiang yang diuji terdapat retakan.
- (d) Ada beberapa pantulan yang tidak beraturan sehingga membutuhkan analisis yang lebih mendalam. Analisis dilakukan untuk memperhitungkan faktor redaman tanah menggunakan alat bantu komputer, kemudian pencocokan sinyal dilakukan antara sinyal hasil pengujian dan hasil pemodelan komputer. Keluaran dari pemodelan ini adalah estimasi diameter tiang terhadap kedalaman.

Pengujian Crosshole Sonic Logging (CSL)

Crosshole Sonic Logging (CSL) adalah metode pengujian yang bersifat tidak merusak (*non-destruktif*) untuk menguji kualitas atau integritas dari sebuah pondasi tiang dengan menggunakan gelombang ultrasonik yang dikirim melalui *transmitter* dan diterima oleh *reciver* (Bina Marga, 2019). Pengujian ini dapat mengindikasikan adanya kerusakan yang terjadi pada beton, seperti retak beton, segregasi material, keropos, serta pengecilan penampang beton (*necking*).



Gambar 4. Pipa Akses (*Access Tube*) dan Peralatan Pengujian CSL (Zhussupbekov, dkk, 2019)



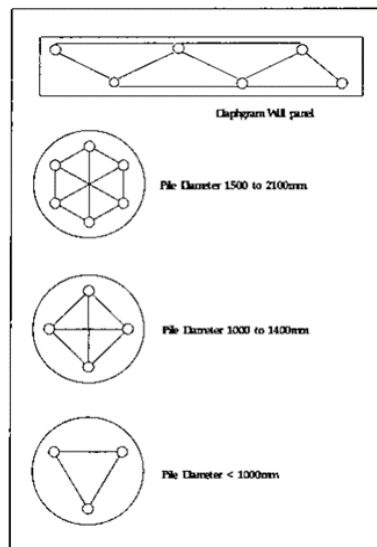
Gambar 5. Skema Pengujian *Crosshole Sonic Logging (CSL)* (Bina Marga, 2019)

Bahan yang harus disiapkan sebelum pengujian integritas tiang dengan metode CSL adalah pipa akses (*access tube*) dari pipa baja dengan diameter internal 38 mm hingga 50 mm. Adapun peralatan yang digunakan antara lain: (1) *Probe transmitter* dan *probe receiver* yang dapat menghasilkan sinyal yang dapat diukur dengan interval kedalaman tiap 2,5 inci atau kurang, (2) Sistem data akuisisi yang dilengkapi dengan perangkat lunak (*software*) untuk memberikan gambaran hasil pengujian, serta komputer yang dapat memberi tayangan saat pengumpulan data, penyimpanan, dan transfer data, (3) Peralatan pengukuran kedalaman untuk mengetahui posisi dan kedalaman *probe*, serta (4) Kabel yang digunakan untuk menghubungkan *probe* dengan sistem data akuisisi. Bahan dan peralatan uji CSL disajikan pada Gambar 4, sedangkan skema pemasangan alat uji disajikan pada Gambar 5.

ASTM (2008) memberikan langkah pengujian integritas tiang dengan CSL menurut standar ASTM D6760-08, yaitu:

(a) Instalasi Pipa Akses

Pipa akses dipasang pada saat tahap konstruksi. Jumlah pipa akses harus mencakup potongan melintang dari pondasi *bored pile*. Untuk menentukan jumlah pipa akses yang dibutuhkan, dapat dilakukan dengan memasang 1 pipa akses setiap diameter pondasi 0.25 – 0.30 m. Jumlah minimum pipa akses yang digunakan sebanyak 3 pipa dan dipasang secara merata sepanjang keliling pondasi. Pipa akses plastik atau material PVC tidak disarankan digunakan untuk pengujian ini, tetapi dapat digunakan pada kondisi tertentu jika telah disetujui dengan syarat pemasangannya lebih rapat dan tidak berubah bentuk akibat temperatur tinggi dari proses *curing*. Konfigurasi yang dapat digunakan dalam pemasangan pipa akses seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Konfigurasi Pemasangan Pipa Akses /Access Tube (ASTM, 2008)

Pipa akses harus tegak lurus, bebas dari material lain, dan sisi luarnya bebas dari kontaminasi oli, minyak, dan kotoran lainnya. Ujung bawah pipa harus tertutup rapat dan ujung atasnya ditutup dengan tutup yang dapat dilepas untuk mencegah beton dan material lainnya masuk kedalam pipa. Jika penyambungan pipa akses diperlukan, hindari penyambungan dengan pengelasan dan penyambungan menggunakan selotip atau senyawa lain. Pemasangan pipa akses sebisa mungkin dipasang sehingga dasar dari pipa akses berdekatan dengan dasar pondasi, sehingga pondasi dapat teruji secara menyeluruh. Pipa akses diikat didalam tulangan pondasi dengan jarak tertentu untuk menjaga *alignment* pipa saat pengangkatan/mobilisasi tulangan. Pipa akses diisi air sebelum atau selambat-lambatnya 1 jam setelah pengecoran untuk memastikan beton merekat dengan baik dengan pipa akses.

(b) Pengujian

Pengujian dilakukan dalam rentang 3 sampai 7 hari setelah pengecoran tergantung dengan kekuatan beton dan diameter tiang. Cek panjang pipa akses dengan menggunakan meteran dengan pemberat. Jika terjadi penyumbatan, catat kedalaman penyumbatan dari atas pipa akses. Cek kembali air dalam pipa akses, jika terjadi pengurangan maka isi kembali pipa akses dengan air. Catat kombinasi pipa akses yang diuji. Letakkan katrol kabel *probe* pada pipa akses. Jumlah kombinasi atau trase pengujian dapat dihitung sesuai Tabel 2.

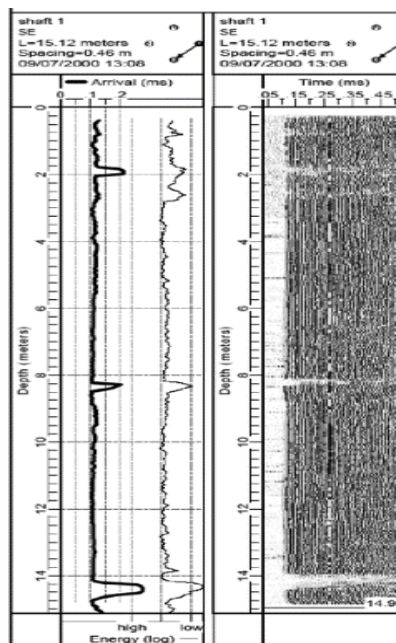
Tabel 2. Jumlah Kombinasi Pengujian CSL

Jumlah Pipa Akses	Jumlah Kombinasi
2	1
3	3
4	6
5	10
N	$n(n-1)/2$

Sumber: Kawanda, 2021

Untuk memulai pengujian, masukkan *probe transmitter* dan *probe receiver* kedalaman pipa akses. Turunkan kedua *probe* secara bersamaan dan hati-hati hingga ujung pipa akses. Mulai perekaman getaran gelombang ultrasonik bersamaan dengan penarikan kedua *probe* hingga ujung atas pipa akses. Ulangi langkah tersebut untuk kombinasi pipa akses lainnya.

Pada pengujian CSL, sumber gelombang dihasilkan dari gelombang bertegangan tinggi, sedangkan penerima gelombang dan pengukuran kedalaman direkam secara bersamaan. Sensor penerima juga dilengkapi dengan peredam yang disesuaikan secara elektronik untuk getaran atau gangguan lainnya. Data yang didapatkan kemudian direkam dan diproses dengan komputer *sonic logging system* (ASTM, 2008). Data yang diperoleh berupa grafik kecepatan gelombang (*wave speed*) terhadap kedalaman (*depth*), grafik waktu tempuh (*arrival time*) terhadap kedalaman (*depth*), energi kedalaman (*depth*) dan *waterfall diagrams* terhadap kedalaman (*depth*). Adapun bentuk grafik hasil pengujian CSL seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Contoh Grafik Hasil Uji CSL (ASTM, 2008)

Menurut Sellountou, dkk (2019), tidak ada kriteria/standar umum untuk mengevaluasi hasil pengujian CSL. Penundaan FAT (*FAT Increase*) direkomendasikan daripada pengurangan kecepatan karena pipa akses sering tidak paralel, dan oleh karena itu kecepatan yang dihitung dari jarak atas mungkin tidak akurat. Walaupun demikian, pengurangan energi (*energy reduction*) yang cukup besar akan menentukan *defect* bahkan jika nilai FAT normal (Likins, dkk, 2007).

Dari pembacaan grafik hasil uji tersebut, dilakukan analisis untuk mengevaluasi integritas tiang beton dengan mengukur waktu rambat gelombang antara sumber dan penerima / *First Arrival Time* (FAT), menghitung cepat rambat yang sesuai (*wavespeed*), dan mengukur energi respon / pengurangan energi penerima (*energy reduction*). Semakin lama waktu tempuh dan semakin lambat kecepatan rambat gelombang menunjukkan adanya anomali material beton antar pipa uji. Sedangkan, sinyal yang hilang atau tidak terbaca, menunjukkan adanya kecacatan (*defect*) di antara satu atau lebih kombinasi pipa. Berdasarkan Likins dkk. (2007), pengelompokan tingkat kondisi integritas tiang beton dapat ditentukan sesuai Tabel 3.

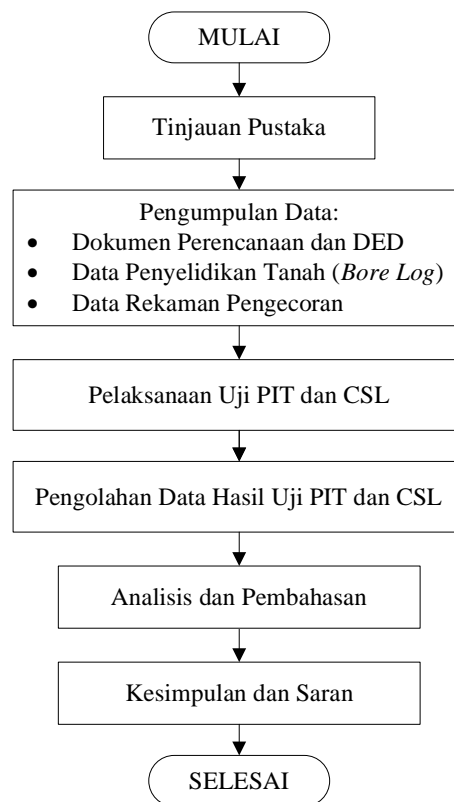
Tabel 3. Klasifikasi Tingkat Kondisi Berdasarkan Uji CSL

<i>FAT Increase</i>		<i>Energy Reduction</i>	<i>Classification</i>
0 to 10%	<i>and</i>	< 6 dB	(G) <i>Good - Satisfactory</i>
11 to 20%	<i>and</i>	< 9 dB	(Q) <i>Questionable - Anomaly</i>
21 to 30%	<i>or</i>	9 to 12 dB	(P/F) <i>Poor/Flaw - Flaw</i>
> 31%	<i>or</i>	> 12 dB	(P/D) <i>Poor/Defect - Defect</i>

Sumber: Likins dkk, 2007

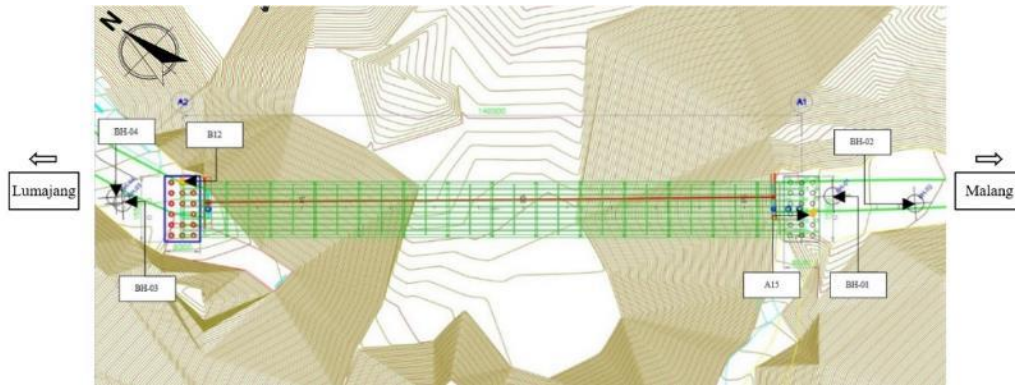
3. METODE PENELITIAN

Metode penelitian dimulai dari tahapan tinjauan pustaka terhadap penelitian terdahulu dan rujukan/standar pengujian integritas beton pada pondasi bor dengan PIT dan CSL. Tahapan berikutnya adalah pengumpulan data, yang terdiri dari: dokumen perencanaan dan DED, data penyelidikan tanah, serta data rekaman pengecoran pondasi. Tahapan selanjutnya berupa pelaksanaan pengujian PIT dan CSL di lapangan. Setelah didapatkan data uji, selanjutnya dilakukan analisis data hasil pengujian, penilaian integritas beton berdasarkan nilai rujukan/standar yang digunakan, dan pembahasan hasil. Langkah akhir berupa penarikan kesimpulan dan saran dari kajian yang telah dilakukan. Langkah-langkah metode penelitian secara detail dijelaskan menggunakan bagan alir pada Gambar 8.



Gambar 8. Bagan Alir Penelitian

Penelitian ini mengambil studi kasus pekerjaan pondasi bor pada Proyek Paket Penggantian Jembatan Besuk Kobo'an, Lumajang, Jawa Timur. Sampel pondasi *bored pile* yang dipilih berdiameter 1000 mm sebanyak 2 titik tiang untuk uji PIT (A15 dan B12) dan 2 titik tiang untuk uji CSL (A1 dan B5). Penyelidikan tanah dilakukan menggunakan metode bor dan uji SPT sebanyak 4 titik uji (BH-01, BH-02, BH-03, dan BH-04). Lokasi penyelidikan tanah dan sampel uji tiang bor disajikan pada Gambar 9, 10, dan 11.



Gambar 9. Lokasi Titik Penyelidikan Tanah (PT Adhi Karya (Persero) Tbk., 2022)



Titik A15 (Sisi Malang)

Diameter tiang uji : 1000 mm
 Panjang total tiang : 20.70 m
 Umur beton saat uji : 23 hari

Titik B12 (Sisi Lumajang)

Diameter tiang uji : 1000 mm
 Panjang total tiang : 23.60 m
 Umur beton saat uji : 33 hari

Gambar 10. Lokasi dan Titik Sampel Uji PIT



Titik A1 (Sisi Malang)

Diameter tiang uji : 1000 mm
 Panjang total tiang : 17.50 m
 Umur beton saat uji : 17 hari

Titik B5 (Sisi Lumajang)

Diameter tiang uji : 1000 mm
 Panjang total tiang : 22.80 m
 Umur beton saat uji : 4 hari

Gambar 11. Lokasi dan Titik Sampel Uji CSL

Metode Uji PIT

Metode pengujian PIT mengacu pada standar ASTM D5882-07. Peralatan utama yang digunakan dalam pengujian berupa perangkat *Pile Integrity Tester* tipe PIT-QV yang dilengkapi dengan *software* PIT-W. *Software* PIT-W ini digunakan untuk memproses data dan menghasilkan grafik uji. Peralatan PIT-QV dioperasikan secara *touchscreen* (layar sentuh) dan dilengkapi dengan fitur *Fast Fourier Transform* (FFT) dan lisensi dari *software* PIT-W. Selain itu, diperlukan peralatan berupa palu untuk melakukan pukulan pengujian serta sensor akselerometer untuk menerima gelombang dan menyalurkannya ke perangkat utama. Pada pengujian ini juga dibutuhkan gerinda sebagai alat bantu untuk meratakan permukaan pondasi bor yang akan diuji.

Sebelum dilakukan pengujian, tahapan pertama yang dilakukan yaitu melakukan penghalusan permukaan pondasi bor yang akan diuji dengan menggunakan gerinda. Penghalusan ini bertujuan untuk membentuk permukaan pondasi bor menjadi datar sehingga akselerometer dapat terpasang dengan baik. Jika permukaan pondasi bor dianggap cukup datar maka dilakukan pemasangan akselerometer. Setelah akselerometer terpasang, maka dilakukan pengujian dengan melakukan pukulan palu pada permukaan pondasi bor. Pukulan dilakukan berulang kali hingga didapatkan grafik yang konsisten. Hasil pengujian PIT ini berupa grafik yang tersaji pada layar perangkat PIT-QV. Dokumentasi peralatan PIT disajikan dalam Gambar 12 dan pelaksanaan PIT disajikan dalam Gambar 13.



Gambar 12. Dokumentasi Peralatan Uji PIT (Dok. Penulis, 2022)



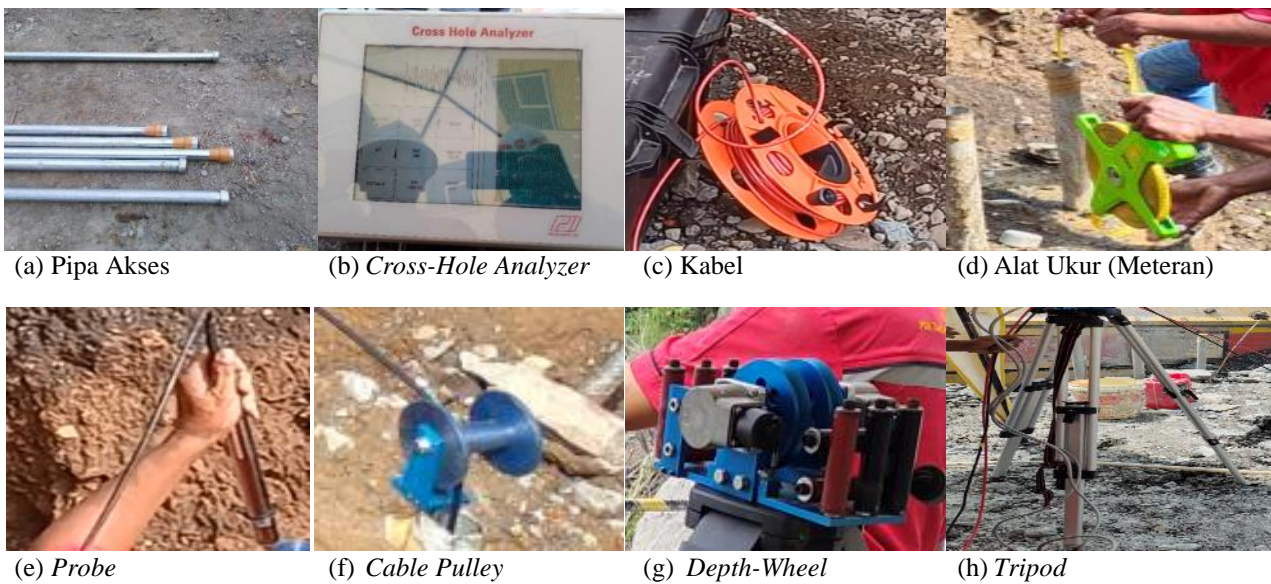
Gambar 13. Dokumentasi Pelaksanaan Uji PIT (Dok. Penulis, 2022)

Metode Uji CSL

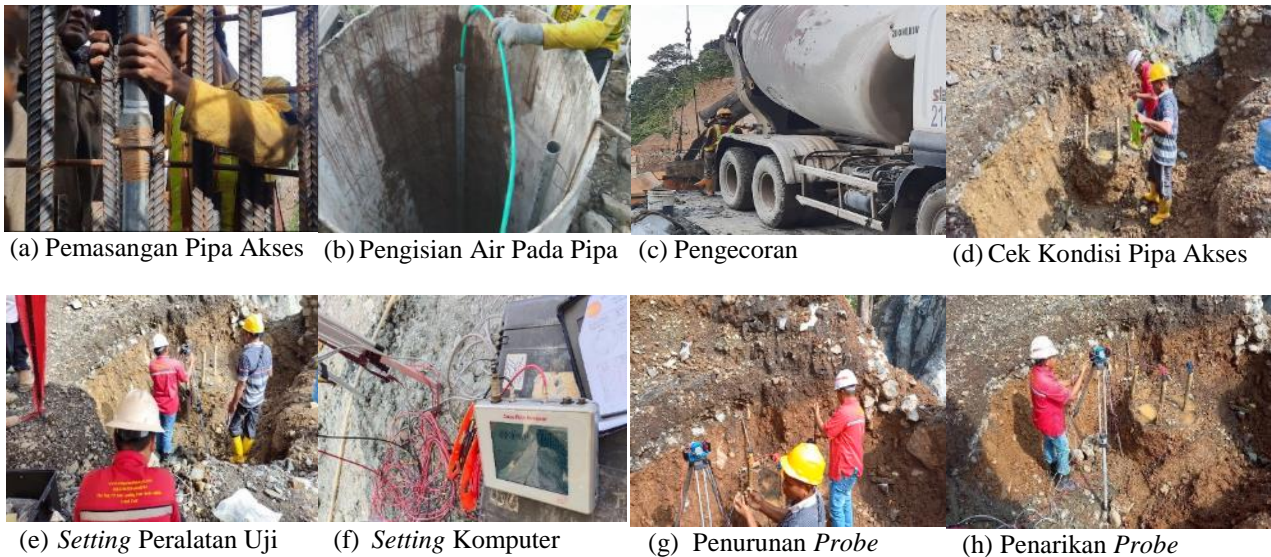
Prosedur pengujian CSL mengacu pada standar ASTM D6760-08. Bahan yang digunakan pada pengujian ini berupa pipa akses (*access pipe*) yang dipasang pada tulangan pondasi sebelum dilakukan pengecoran. Pada proyek ini, digunakan 3 set pipa akses dengan diameter 54 mm dan tebal 2 mm, dimana masing-masing set terdiri dari 4 buah pipa dengan panjang 6 m. Adapun peralatan yang dibutuhkan antara lain: perangkat komputer *sonic logging* tipe CHAMP-Q yang dilengkapi dengan *software* CHA-W untuk mengolah dan menampilkan data hasil pengujian, *probe transmitter* dan *probe receiver* sebagai sensor penghasil dan penerima gelombang, kabel sebagai penghubung *probe* dengan komputer, *probe cable pulley* yang digunakan untuk membantu penurunan dan penarikan kabel, *depth wheel* untuk mengukur dan mengetahui posisi *probe*, serta *tripod* sebagai dudukan dari *depth wheel*. Alat bantu meteran dengan pemberat di bagian ujung digunakan dalam pengecekan kedalaman pipa akses dan ketinggian air di pipa akses.

Tahap persiapan pengujian berupa instalasi pipa akses pada tulangan pondasi *bored pile*. Tahap ini diawali dengan penyambungan pipa-pipa menjadi 3 set pipa akses menggunakan lem *epoxy* dan selotip. Pada ujung bawah dan atas dari setiap set pipa akses juga dipasang penutup. Langkah selanjutnya yaitu pemasangan pipa akses, dimana pipa dipasang 1 m dari dasar tiang dan diikat dengan kawat bendrat dengan jarak 1 m antar ikatan. Tulangan dengan pipa akses dipasang ke dalam lobang bor lalu dilanjutkan dengan pengecoran material beton $f_c'30$ MPa dengan nilai *slump* 16 ± 2 cm. Pada waktu kurang dari 1 jam setelah pengecoran dilakukan pengisian air ke dalam pipa akses. Pengujian CSL pada titik A1 dilakukan 17 hari setelah pengecoran, sedangkan pada titik B5 dilakukan 4 hari setelah pengecoran.

Tahap pengujian diawali dengan pengecekan pipa akses dan ketinggian air di dalam pipa akses. Pengecekan dilakukan dengan menurunkan meteran yang dilengkapi dengan pemberat ke dalam pipa akses. Pengecekan ini berfungsi untuk mengetahui kondisi pipa akses, apakah terjadi penyumbatan yang menghalangi *probe* saat dilakukan pengujian. Selain itu, pengecekan juga berfungsi untuk mengetahui ketinggian air di dalam pipa akses, sehingga penambahan air dapat dilakukan apabila elevasi air telah mengalami penurunan. Selanjutnya, dilakukan *setting* peralatan berupa pemasangan *depth wheel* pada *tripod* dan *probe cable pulley* pada masing-masing kombinasi pipa akses. Pengujian dilakukan dengan memasukan *probe transmitter* dan *probe receiver* ke dalam pipa akses. Setelah *probe* mencapai dasar pipa, dilakukan perekaman data bersamaan penarikan kedua *probe*. Langkah tersebut dilakukan untuk setiap kombinasi pipa akses. Dokumentasi bahan, peralatan, dan pelaksanaan uji CSL disajikan pada Gambar 14 dan Gambar 15.



Gambar 14. Dokumentasi Peralatan Uji CSL (Dok. Penulis, 2022)

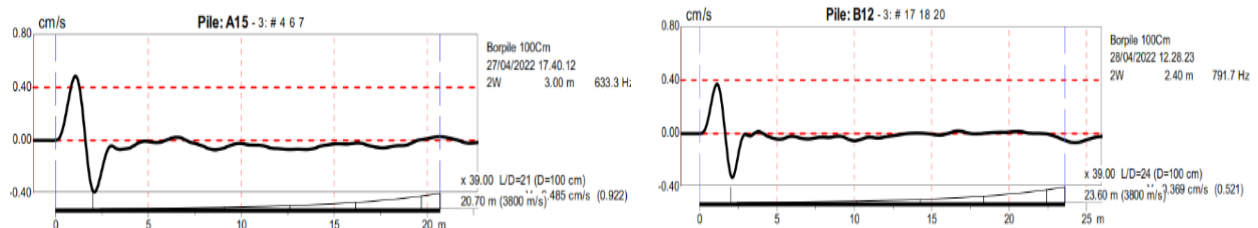


Gambar 15. Dokumentasi Pelaksanaan Uji CSL (Dok. Penulis, 2022)

4. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Integritas Pondasi Bor Berdasar Uji PIT

Gambar 16 menunjukkan grafik hubungan kecepatan gelombang terhadap panjang/kedalaman tiang dari hasil pengujian PIT pada titik A15 dan B12.



Gambar 16. Grafik Hasil Uji PIT Titik A15 dan B12 (PT. Megah Adhi Karya, 2022)

Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa tidak terdapat pantulan gelombang setelah gelombang pertama di permukaan tiang. Dalam hal dijumpai kondisi sinyal yang tidak terduga, informasi data penyelidikan tanah di area pengujian

diperlukan untuk membantu dalam pemrosesan data dan menjelaskan fenomena yang terjadi (Zhussupbekov, dkk, 2019). Pantulan gelombang tidak terlihat di dasar tiang dimungkinkan terjadi ketika tidak adanya perubahan ekstrim nilai kerapatan material beton pada pondasi dengan tanah di dasar tiang, sehingga sinyal diteruskan. Dalam hal ini, dapat diasumsikan bahwa kondisi tanah di dasar tiang berupa tanah keras atau batuan dengan kerapatan materialnya mendekati beton pondasi bor. Oleh karena itu, data penyelidikan tanah dengan pemboran (*bore log*) diperlukan untuk memvalidasi asumsi tersebut.

Tabel 4. *Bore Log* Titik BH-01 dan BH-02 Sisi Malang (A)

Titik Bor	Kedalaman	Jenis Tanah	Nilai N-SPT	Kategori Kepadatan
BH-01	0.00 - 2.00	Pasir dan Batu, Hitam	>60	Sangat Padat
	2.00 - 4.00	Batu, Hitam	>60	Sangat Padat
	4.00 - 8.00	Lempung, Lanau Pasir, dan Batu Kerikil, Coklat	34-37	Padat
	8.00 - 10.00	Batu, Hitam	42	Padat
	10.00 - 14.00	Pasir Lanau dan Batu, Coklat	50-59	Sangat Padat
	14.00 - 16.00	Pasir Lanau dan Batu, Coklat	59	Sangat Padat
	16.00 - 40.00	Batu, Abu-abu dan Hitam	>60	Sangat Padat
BH-02	0.00 - 2.00	Pasir dan Batu, Hitam	>60	Sangat Padat
	2.00 - 40.00	Batu, Hitam	>60	Sangat Padat

Sumber: CV. Fenestram Multi Engineering (2022)

Tabel 5. *Bore Log* Titik BH-03 dan BH-04 Sisi Lumajang (B)

Titik Bor	Kedalaman	Jenis Tanah	Nilai N-SPT	Kategori Kepadatan
BH-03	0.00 - 2.00	Batu Berpasir, Hitam	>60	Sangat Padat
	2.00 - 40.00	Batu, Hitam	>60	Sangat Padat
BH-04	0.00 - 2.00	Batu Berpasir, Hitam	>60	Sangat Padat
	2.00 - 40.00	Batu, Hitam	>60	Sangat Padat

Sumber: CV. Fenestram Multi Engineering (2022)

Tabel 4 dan 5 menunjukkan data *bore log* dan nilai SPT di sekitar lokasi titik uji. Pada elevasi dasar pondasi bor A15 (20,70 m) dan pondasi bor B12 (23,60 m) berupa batuan berwarna hitam dengan nilai N-SPT >60. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pondasi bor A15 dan B12 bertumpu di atas lapisan batuan keras. Karakteristik material beton pondasi bor dan batuan keras di dasar pondasi menyebabkan gelombang yang diterima pada ujung dasar pondasi tidak dipantulkan kembali ke atas, namun gelombang diteruskan ke lapisan batuan di bawahnya.

Tabel 6. Rekapitulasi Hasil Uji PIT

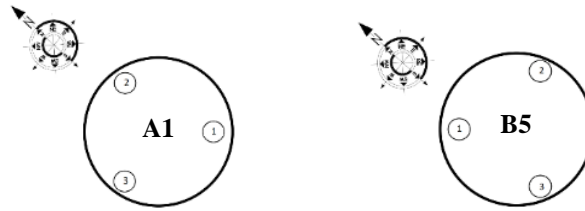
No Tiang	Panjang Tiang (m)	Pantulan Gelombang (m)	BTA (%)	Klasifikasi
A15	20,70	Tidak terlihat	100	<i>Undamaged</i>
B12	23,60	Tidak terlihat	100	<i>Undamaged</i>

Sumber: PT. Megah Adhi Karya (2022)

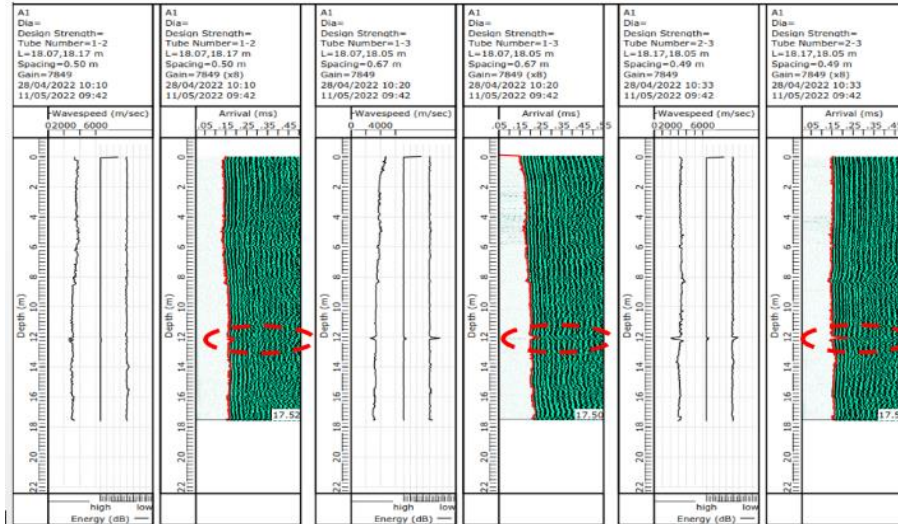
Tabel 6 menunjukkan nilai impedansi (BTA) pada sampel pondasi bor di titik A15 maupun B12. Menurut American Standard Testing and Material (1979), suatu tiang dikategorikan sebagai *undamaged* apabila mempunyai nilai impedansi (BTA) sebesar 100%. Berdasarkan hasil uji PIT diperoleh nilai BTA sebesar 100%, sehingga sampel pondasi dapat dikategorikan sebagai *undamaged*. Kondisi *undamaged* menunjukkan bahwa kondisi beton di sepanjang pondasi bor tidak ditemukan adanya cacat atau kerusakan, sehingga dikatakan bahwa tiang uji memiliki integritas (keutuhan) beton yang baik

Integritas Pondasi Bor Berdasar Uji CSL

Hasil pengujian CSL diperoleh luaran berupa grafik hubungan cepat rambat gelombang (*wavespeed*), *pulse energy amplitude*, waktu kedatangan (*arrival time*), serta *waterfall diagram* terhadap kedalaman tiang. Data *wave speed* diperoleh dari perhitungan jarak antar pipa dibagi dengan *First Arrival Time* (FAT). Data hasil uji CSL disajikan berdasarkan kombinasi pipa akses yang dipasang pada tiang uji seperti terlihat pada Gambar 17.

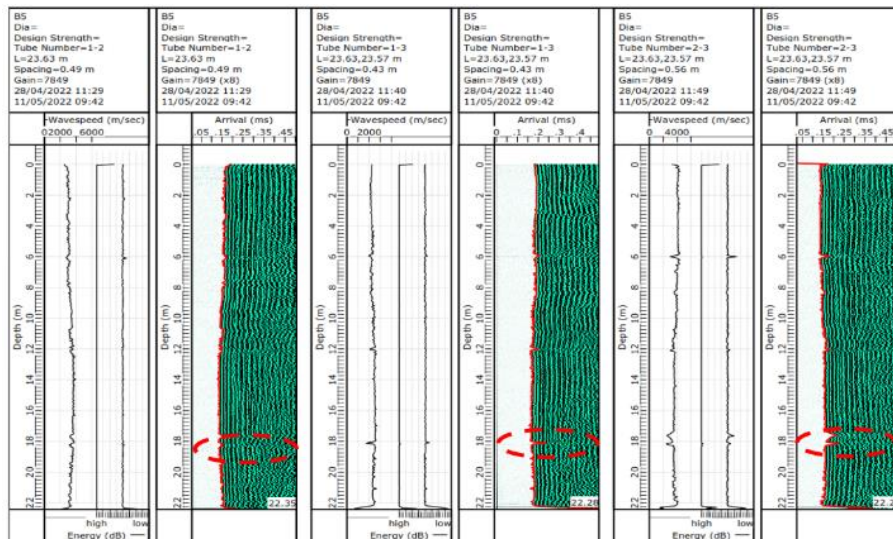


Gambar 17. Konfigurasi Pemasangan Pipa Akses CSL pada tiang A1 (kiri) dan B5 (kanan)



Gambar 18. Grafik CSL Titik A1 (PT. Megah Adhi Karya, 2022)

Gambar 18 menunjukkan hasil pengujian CSL pada tiang uji A1, dimana pada kombinasi 1-2 terjadi penundaan waktu kedatangan awal sinyal (FAT) dan pengurangan energi terdeteksi pada kedalaman 12.2 m, sedangkan pada kombinasi 1-3 dan kombinasi 2-3 terdeteksi pada kedalaman 12.0 m. Adanya penundaan waktu kedatangan sinyal dan pengurangan energi mengindikasikan adanya penurunan kerapatan material yang dilewati pada *trace* tersebut.



Gambar 19. Grafik CSL Titik B5 (PT. Megah Adhi Karya, 2022)

Gambar 19 menunjukkan hasil pengujian CSL pada tiang uji B5, dimana pada kombinasi 1-2 terjadi penundaan waktu kedatangan awal sinyal (FAT) dan pengurangan energi terdeteksi pada kedalaman 18.2 m, pada kombinasi 1-3 terdeteksi pada kedalaman 18.0 m, sedangkan pada kombinasi 2-3 terdeteksi pada kedalaman 18.3 m. Adanya penundaan waktu kedatangan sinyal dan pengurangan energi mengindikasikan adanya penurunan kerapatan material yang dilewati pada *trace* tersebut.

Tabel 7. Rekapitulasi Hasil Pengujian CSL

No Tiang	Kombinasi Uji	Panjang Tiang (m)	Peningkatan FAT (%)	Reduksi Energi (dB)	Lokasi Reduksi Energi (m)	Klasifikasi
A1	1-2	17,50	0 - 10	< 6	12,2	(G) Good
	1-3	17,50	0 - 10	< 6	12,0	(G) Good
	2-3	17,50	0 - 10	< 6	12,0	(G) Good
B5	1-2	22,28	0 - 10	< 6	18,2	(G) Good
	1-3	22,28	0 - 10	< 6	18,0	(G) Good
	2-3	22,28	0 - 10	< 6	18,3	(G) Good

Sumber: PT. Megah Adhi Karya, 2022

Tabel 7 menunjukkan rekapitulasi hasil pengujian CSL pada titik A1 dan B5. Menurut Likins, dkk (2007) dan Bina Marga (n/a), beton diklasifikasikan dalam kondisi *good* (baik) jika memiliki FAT yang meningkat 0 sampai 10% dan reduksi energi kurang dari 6 dB. Zona cacat ditentukan oleh peningkatan waktu kedatangan lebih dari 20% relatif terhadap waktu kedatangan di zona terdekat dengan beton yang baik, mengindikasikan kecepatan gelombang yang lebih rendah (Likins, dkk, 2007 dan Zhussupbekov, 2019). Keutuhan beton sepanjang badan pondasi bor juga dapat diamati secara visual pada *waterfall diagram* pada Gambar 18 dan 19. Intensitas grafik secara menerus tanpa adanya celah (*gap*) menunjukkan bahwa tidak ditemukan adanya penundaan waktu kedatangan awal sinyal (FAT) di sepanjang pondasi bor, yang menunjukkan bahwa material beton mempunyai nilai kerapatan yang sama dan seragam di sepanjang tiang. Dengan demikian, kedua sampel tiang A1 dan B5 disimpulkan memiliki keutuhan beton dengan kategori *Good* (baik) berdasarkan uji CSL.

Metode uji integritas beton dengan PIT dan CSL merupakan metode yang cukup efektif untuk mengontrol kualitas dan keutuhan beton pondasi bor. Perbandingan terhadap kedua metode uji ini pernah dilakukan terhadap 66 buah pondasi bor berdiameter 1.37 m, dimana hasil uji kedua metode tersebut kadang memberikan perbedaan hasil dalam deteksi adanya anomali pada tiang bor. Studi oleh White (2008) memperlihatkan pengujian CSL cenderung lebih sering mendeteksi adanya anomali yang tidak dapat terdeteksi melalui uji PIT. Penggunaan kedua metode pengujian ini harus disertai dengan pemahaman terhadap Batasan-batasan pengujian serta pengalaman untuk melakukan interpretasi hasil pengujian. Zhussupbekov, dkk (2019) merekomendasikan penggunaan kombinasi dari kedua metode uji tersebut untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat dan komprehensif.

Penggunaan uji PIT memberikan keuntungan seperti biaya relatif murah dan persiapan tiang yang minimal, sehingga pelaksanaan uji dapat dilakukan secara cepat untuk keseluruhan pondasi bor yang telah terpasang. Namun demikian, penentuan integritas beton di bawah kerusakan utama tidak dapat terdeteksi menggunakan uji ini. Keterbatasan yang melekat pada metode pengujian ini terkadang dapat menyebabkan interpretasi hasil yang rumit atau tidak konsisten. Sementara itu, pengujian dengan CSL membutuhkan persiapan yang lebih banyak, seperti pemasangan pipa akses saat cor beton, sehingga uji ini tidak memungkinkan dilakukan pada pondasi bor yang telah terpasang. Namun, uji CSL memberikan lebih banyak kemampuan untuk mengukur anomaly (kerusakan) beton tiang bor, serta memungkinkan mendeteksi kondisi beton secara lebih akurat di bawah kerusakan utama meskipun terbatas dalam trase pipa akses.

5. KESIMPULAN

Kesimpulan

- Metode pemeriksaan integritas beton menggunakan metode *Pile Integrity Test* (PIT) sudah sesuai dengan standar rujukan ASTM D5882-07. Namun demikian, untuk metode pemeriksaan dengan *Crosshole Sonic Logging* (CSL) masih ditemukan beberapa ketidaksesuaian antara pelaksanaan dengan standar rujukan ASTM D6760-08, yaitu jumlah kombinasi pipa akses, bahan penyambung pipa akses, dan koridor waktu pelaksanaan pengujian.
- Hasil pengujian *Pile Integrity Test* (PIT) pada tiang uji A15 dan B12 menunjukkan bahwa integritas beton termasuk dalam klasifikasi *un-damage* dengan nilai impedansi (BTA) sebesar 100%. Adapun hasil pengujian *Crosshole Sonic Logging* (CSL) pada tiang uji A1 dan B5 menunjukkan bahwa integritas beton termasuk dalam klasifikasi *Good* (G) dengan nilai FAT antara 0 sampai 10% dan reduksi energi kurang dari 6 dB. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa seluruh sampel pondasi bor memiliki keutuhan (integritas) beton yang baik.

Saran

- Grafik hasil pengujian *Pile Integrity Test* (PIT) menunjukkan bahwa tidak ditemukannya pantulan gelombang di kedalaman rencana dasar tiang dikarenakan pondasi bor bertumpu di atas lapisan batuan. Dalam hal ditemukan fenomena sinyal yang tidak biasa dan untuk menghindari mis-interpretasi hasil uji maka disarankan pembacaan grafik pengujian PIT didukung dengan data penyelidikan tanah.

- b) Jumlah kecukupan minimal pipa akses (*access tube*) pada pengujian *Crosshole Sonic Logging* (CSL) untuk pondasi bor dengan diameter 1000 mm agar disesuaikan menjadi 4 buah. ASTM D6760-08 merekomendasikan untuk pondasi bor dengan diameter antara 1000 - 1400 mm menggunakan 4 buah pipa akses. Selain itu, proses penyambungan pipa akses sebaiknya dihindari menggunakan selotip karena berpotensi mempengaruhi keakuratan data akibat inkonsistensi material pada sambungan pipa akses.
- c) Waktu pelaksanaan pengujian CSL yang direkomendasikan oleh ASTM D6760-08 adalah saat umur beton antara 3 sampai 7 hari untuk meminimalisir lepasnya ikatan antara beton dengan pipa akses sehingga berpotensi dapat mempengaruhi keakuratan data uji.

DAFTAR PUSTAKA

- American Standard Testing and Material. (1979). STP-670 Behavior of Deep Foundation. West Philadelphia, ASTM International.
- American Standard Testing and Material. (2007). ASTM D5882-07 Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations. West Conshohocken, ASTM International.
- American Standard Testing and Material. (2008). ASTM D6760-08 Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundation by Ultrasonic Crosshole Testing. West Conshohocken, ASTM International.
- CV. Fenestram Multi Engineering. (2022). Laporan Hasil Penyelidikan Tanah Proyek Jembatan Besuk Koboan. Surabaya.
- Hartono, J., Saleh, M., & Khoiroh, U. (2021). Evaluasi Keutuhan Borepile Metode Crosshole Sonic Logging (CSL) Pembangunan Jembatan Pulau Balang II. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 19, 465.
- Kawanda, Aksan. (2021). Uji Integritas Pada Fondasi Dalam. Makassar.
- Kementerian PUPR, Ditjen Bina Marga. (2019). Panduan Teknik Pelaksanaan Jembatan. Jakarta.
- Kementerian PUPR, Ditjen Bina Marga. (2019). Panduan Teknik Pengawasan Pelaksanaan Jembatan. Jakarta.
- Kementerian PUPR, Ditjen Bina Marga. (n/a). Spesifikasi Khusus – Interim Skh-1 7.6.(27). A Crosshole Sonic Integrity Logging, Jakarta.
- Kementerian PUPR, Puslitbang Jalan dan Jembatan. (2015). Pedoman Persyaratan Umum Perencanaan Jembatan. Jakarta.
- Likins, G., Rausche, F., Webster, K., & Klesney, A. (2007). Defect Analysis for CSL Testing. *Geo-Denver 2007 New Peaks in Geotechnics*. Denver, CO.
- M. W. Sarhan, H. A., and O'Neill. (2002), "Aspects of Structural Design of Drilled shafts for Flexure." *Aspects of Structural Design of Drilled shafts for Flexure*, Orlando, pp. 1151–1165.
- PT. Adhi Karya (Persero) Tbk. (2022). Gambar Desain Pondasi Bored Pile. Lumajang.
- PT. Megah Adhi Karya. (2022). Laporan Crosshole Sonic Logging Jembatan Besuk Kobokan Lumajang. Jakarta.
- PT. Megah Adhi Karya. (2022). Laporan Pile Integrity Test Jembatan Besuk Kobokan Lumajang. Jakarta Utara.
- Sellountou, E. A., Amir, J., Canivan, G., Chernauskas, L., Hertlein, B., Kandar, P., Kovac, T., & Likins, G. (2019). Terminology and Evaluation Criteria of Crosshole Sonic Logging (CSL) as Applied to Deep Foundations. New Jersey, Deep Foundations Institute.
- Tulebekova, A., Shakirova, N., & Shakirova, N., Zhankina, A., & Muratov, Y. (2021). Non-destructive testing of bored piles. *Technobius*, 1 (3), 002.
- White, B., Nagy, M., & Allin, R. (2008). Comparing cross-hole sonic logging and low-strain integrity testing result. *The 8th International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles*, Lisbon, pp. 471-476.
- Zhussupbekov, A., Morev, I., Tanyrbergenova, G., & Shakirova, N. (2019). Evaluation of The Quality of Pile Foundations by Different Methods. *MATEC Web of Conferences*, 265, 11.