

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton merupakan material yang sering digunakan pada struktur bangunan. Salah satu alasannya adalah kemudahan dalam pengerjaan yang didukung dengan kekuatan yang tinggi. Dalam hal kekuatan, beton kuat menahan tekan tetapi lemah dalam menahan gaya tarik. Oleh sebab itu, dalam banyak pekerjaan sipil, beton dikombinasikan dengan baja yang kuat menahan gaya tarik atau yang sering disebut beton bertulang.

Selain memiliki kelebihan yang telah disebutkan diatas, beton juga memiliki beberapa kelemahan. Salah satu kelemahan tersebut seringkali disebabkan oleh kesalahan perencanaan. Kesalahan dalam perencanaan dapat mengakibatkan beton tidak kuat dalam menahan beban yang bekerja sehingga mengakibatkan retak.

Keretakan pada beton bisa disebabkan oleh berbagai faktor seperti beban berlebih, perubahan suhu, dan faktor lingkungan lainnya. Kedalaman keretakan adalah parameter kunci yang perlu diukur untuk menilai tingkat kerusakan beton dan mengambil langkah-langkah perbaikan yang diperlukan. Oleh karena itu, analisa yang akurat terhadap kedalaman keretakan sangat penting dalam pemeliharaan dan perbaikan struktur beton.

Metode *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) merupakan salah satu metode *non-destructif* yang umum digunakan untuk mengukur kedalaman keretakan pada beton.

UPV adalah metode pengujian beton dengan cara menyalurkan gelombang *ultrasonic* ke dalam beton. Dengan cara tersebut, nantinya akan didapatkan waktu rambat gelombang yang dapat menggambarkan kedalaman retak dalam beton.

Penggunaan alat ini sangat menguntungkan, disamping penggunaannya yang tidak terlalu rumit alat ini juga tidak merusak beton yang diuji. Akan tetapi, alat UPV tetap perlu divalidasi agar dapat diketahui hubungan antara hasil yang didapatkan oleh alat tersebut dengan keadaan beton sebenarnya.

Maka dari itu, penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi dan menganalisis efektivitas metode UPV dalam mendeteksi kedalaman keretakan pada sampel beton.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini akan menjawab beberapa pertanyaan pokok, yaitu:

- 1) Bagaimana efektivitas metode UPV dalam mendeteksi kedalaman retak pada sampel beton?
- 2) Apakah metode UPV dapat memberikan informasi yang akurat mengenai kedalaman retak pada sampel beton?

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini memiliki batasan sebagai berikut:

- 1) Penelitian akan berfokus pada deteksi keretakan pada sampel beton dengan menggunakan metode *indirect*
- 2) Kedalaman retak buatan pada beton sedalam 1cm, 2cm, 3,5cm, 4cm, 4,5cm 6,5cm

1.4 Tujuan

Tujuan utama dari penelitian ini adalah:

- 1) Untuk menganalisis efektivitas metode UPV dalam mendeteksi kedalaman retak pada sampel beton.
- 2) Untuk mengetahui kedalaman retak pada sampel beton menggunakan metode UPV.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

- 1) Menambah pemahaman yang lebih baik tentang kemampuan metode UPV dalam mendeteksi kedalaman retak pada sampel beton.
- 2) Memberikan informasi yang berguna bagi profesional dalam industri konstruksi untuk mengambil langkah-langkah perbaikan yang lebih akurat terhadap retak pada struktur beton.

1.6 Sistematika Penulisan

Skripsi ini terdiri dari lima bab, yang disusun dengan sistematika berikut :

BAB 1. PENDAHULUAN

Bab ini mengandung uraian tentang informasi secara keseluruhan dari penelitian ini yang berkenaan dengan latar belakang penelitian, rumusan masalah, batasan masalah maksud dan tujuan diadakan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi uraian mengenai dasar-dasar teori yang berkaitan dengan penelitian.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini membahas mengenai uraian tentang tempat dan waktu, metode, bahan, peralatan, rancangan, pelaksanaan penelitian, variabel penelitian serta uraian teknik pengukuran dan pengolahan penelitian.

BAB 4. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil analisis perhitungan data-data yang diperoleh dari hasil pengujian serta pembahasan dari hasil pengujian yang diperoleh.

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini memuat uraian tentang kesimpulan yang dapat diambil dari hasil-hasil analisis terhadap hasil penelitian yang telah dilakukan yang disertai dengan saran-saran yang diusulkan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton

Beton merupakan bahan konstruksi komposit yang didapatkan dari hasil pencampuran antara agregat kasar dan halus dengan pasta semen. Melalui reaksi kimia yang disebut dengan hidrasi, pasta semen yang melapisi permukaan agregat akan mengalami pengerasan dan membentuk material seperti batu. Kualitas dari pasta sangat ditentukan oleh karakteristik beton yang akan dibuat, namun sebaliknya, kekuatan dari pasta bergantung pada nilai rasio air dan semen (FAS). Beton dengan kualitas yang tinggi dihasilkan dari menurunkan angka FAS sebisa mungkin tanpa mengurangi nilai *workability* dari beton segar. Komposisi material penyusun beton harus direncanakan sebaik mungkin dengan menggunakan panduan *mix design* berdasarkan SNI 03-2834-2000. Perencanaan ini bertujuan untuk memudahkan pencapaian mutu beton yang direncanakan. Umumnya, campuran beton terdiri dari 15% semen, 60-75% agregat, dan 15-20% air. Beton digunakan sebagai bahan konstruksi karena kekuatannya dalam menahan tekan. Umur beton sangat mempengaruhi nilai kuat tekannya. Umur beton dihitung setelah pengecoran selesai dilakukan. Beton akan mendapatkan kekuatan optimumnya ketika sudah mencapai umur 28 hari (Dipohusodo, 1996). Namun dibalik kelebihanannya dalam menahan tekan, beton sangat lemah terhadap tarik. Kuat tarik beton biasanya hanya sekitar 9% hingga 15% dari kuat tekannya.

2.1.1 Semen

Semen merupakan suatu campuran senyawa kimia yang bersifat hidrolis yang dapat merekatkan material atau agregat dan membentuk sebuah material baru yang keras seperti batu. Semen ini dikembangkan dari hasil industri paduan bahan baku berupa batu kapur atau gamping sebagai bahan utamanya dan lempung atau tanah liat dengan hasil akhir berupa padatan yang berbentuk bubuk (*bulk*). Reaksi semen dengan air akan berlangsung secara *irreversible*, yang artinya kondisi ini tidak bisa kembali lagi ke kondisi semula. Dalam buku Bahan Bangunan (Hendro Suseno, 2010).

Semen merupakan bahan yang memiliki beragam kegunaan pada bangunan, baik dari segi struktural maupun non struktural seperti :

- a. Sebagai bahan baku utama beton.
- b. Sebagai bahan baku produk semen berserat.
- c. Sebagai bahan perbaikan tanah.
- d. Sebagai bahan penambal retakan maupun keropos.
- e. Sebagai bahan baku produk mortar seperti plester, plamir, acian, pipa, paving block, atap dan lain-lain.

Penelitian ini menggunakan *Portland Composite Cement (PCC)* dimana jenis semen yang sama penggunaannya dengan Semen Portland Tipe I, yaitu cocok untuk berbagai jenis aplikasi beton yang mana tidak membutuhkan syarat khusus. Semen jenis ini memiliki panas hidrasi yang lebih rendah selama proses pendinginan, sehingga memudahkan pengerjaannya dan dapat memperoleh permukaan beton yang lebih rapat dan halus.

2.1.2 Agregat Kasar

Berdasarkan SNI 1970-2008, agregat kasar adalah kerikil sebagai hasil desintegrasi alami dari batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu yang mempunyai ukuran butir antara 5 mm (Ayakan No.4) sampai 40 mm (Ayakan No. 1½ inch). Ketentuan agregat kasar yang dapat digunakan untuk beton dengan mutu tinggi adalah sebagai berikut :

- i. Dilarang mengandung lumpur melebihi 1% dalam berat keringnya. Jika melampauinya harus dicuci kembali.
- ii. Butiran agregat kasar yang pipih hanya boleh digunakan jika secara keseluruhannya tidak melebihi 20% dari berat agregat.
- iii. Ukiran butir terbesar dari agregat tidak boleh melebihi dari 1/5 jarak terkecil antara bidang – bidang samping cetakan, 1/3 dari tebal pelat beton atau 3/4 dari jarak bersih antar tulangan.
- iv. Terdiri dari butiran keras dan tidak berpori serta mempunyai indeks kekerasan \leq 5% bila diujikan menggunakan Los Angeles atau bejana Rudeloff.
- v. Dilarang mengandung zat seperti zat relatif alkali karena dapat merusak beton. vi. Angka kehalusan (Fineness Modulus) dari agregat kasar adalah diantara 7,49 – 9,55 (ASTM C 35 – 37).

2.1.3 Agregat Halus

Agregat halus, berdasarkan SNI 02-6820-2002, adalah agregat dengan besar butir maksimum 4,75 mm. Agregat halus merupakan bahan pengisi diantara agregat

kasar sehingga menghasilkan ikatan yang lebih kuat. Dalam pembuatan beton, gradasi agregat dapat menjadi sangat krusial. Apabila beton mempunyai penyebaran butiran agregat yang homogen, maka volume pori akan tinggi. Berbeda dengan distribusi butiran agregat yang heterogen, maka volume pori akan rendah. Sehingga tingkat kemampatannya akan tinggi dan dibutuhkan lebih sedikit bahan pengikat. Menurut SK SNI T-15-1990-03, berdasarkan gradasinya, kekasaran dapat diklasifikasikan menjadi 4 kelompok, antara lain :

- Zona I : Pasir Kasar
- Zona II : Pasir Agak Kasar
- Zona III : Pasir Agak Halus
- Zone IV : Pasir Halus

Adapun persyaratan agregat halus secara umum adalah sebagai berikut :

- a. Lumpur harus kurang dari 5% terhadap berat keringnya. Agregat halus harus dicuci kembali jika kadar lumpurnya melampaui 5%.
- b. Gradasi agregat harus memenuhi syarat :
 1. Sisa diatas ayakan 4 mm, berjumlah minimum 2% berat.
 2. Sisa diatas ayakan 1 mm, berjumlah minimum 10% berat.
 3. Sisa diatas ayakan 0,25 mm, berjumlah sekitar antara 80% hingga 95% berat.
- c. Angka kehalusan (*Fineness Modulus*) untuk agregat halus berkisar antara 2,3 – 3,1 (ASTM C 35 – 37).

2.1.4 Air

Secara ilmiah, air dapat diartikan sebagai senyawa kimia yang terdiri dari dua unsur, yaitu unsur hidrogen yang berkaitan dengan unsur oksigen. Di dalam proses pembuatan beton, air merupakan salah satu bagian penting yaitu sebagai campuran semen agar terjadi reaksi kimiawi yang mengakibatkan adanya pengerasan antara semen dan bahan penyusun lainnya. Jumlah air dalam campuran beton perlu diperhitungkan, penambahan jumlah air yang tidak sesuai dengan FAS yang telah ditentukan dapat mengurangi kekuatan beton setelah mengeras. Untuk jumlah air yang dibutuhkan dalam proses hidrasi umumnya hanya sekitar 35% dari berat semennya. Berdasarkan SNI 03-2847-2002 mengenai Tata Cara Perhitungan Standar Beton untuk Bangunan Gedung, dalam pembuatan beton, air setidaknya terpenuhi syaratnya sebagai air minum tawar, tidak berbau, serta tidak mengandung zat – zat yang dapat merusak beton, contohnya garam, minyak, asam, ataupun bahan organik lainnya.

2.1.5 Keretakan Beton

Keretakan adalah masalah umum yang sering dihadapi dalam konstruksi beton dan merupakan salah satu tantangan utama dalam pemeliharaan struktur beton. Keretakan dapat terjadi pada berbagai jenis proyek, termasuk bangunan, jembatan, jalan, dan infrastruktur lainnya. Untuk memahami mengapa keretakan menjadi masalah umum dalam beton, kita perlu mempertimbangkan berbagai faktor yang memengaruhi terjadinya keretakan dan dampaknya terhadap integritas struktural.

Seperti pada penelitian sebelumnya yang berjudul Pendeteksian Kedalaman Retak Beton Menggunakan Metode Ultrasonik pada penelitian tersebut mencari tau seberapa dalam keretakan yang terjadi pada dinding beton yang disebabkan oleh rembesan air di dinding ruang purifikasi yang mengakibatkan genangan air yang cukup banyak di ruangan tersebut dan hasil yang didapat adalah dikatakan keretakan beton sangat bervariasi tergantung dari kelemahan struktur beton tersebut, karena sifat air selalu mencari celah/jalan untuk bisa mengalir. Sejalan dengan bertambahnya umur bangunan, maka kekuatannya pun akan semakin menurun, hal tersebut disebabkan karena adanya kerusakan pada bagian dari bangunan ataupun penurunan kualitas beton. Penurunan kualitas beton pada bangunan sangat dipengaruhi oleh beban, iklim, cuaca dan lingkungan. Dengan adanya pengaruh tersebut, maka karakteristik beton lambat laun akan mengalami perubahan (Dyah Sulistyani R & Sumaryanto, 2010).

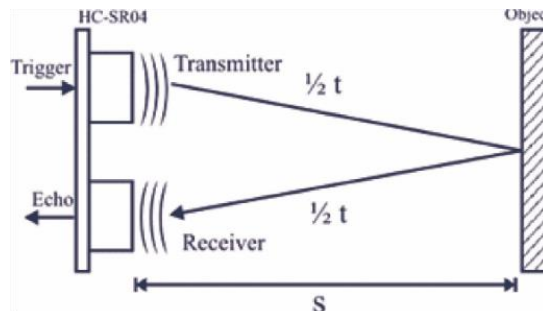
2.2 Metode Non-Destructive Testing (NDT)

Pengujian NDT, saat ini telah banyak digunakan dalam dunia sipil. Salah satu metode dari NDT adalah penggunaan *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV), yang digunakan untuk memperkirakan kekuatan beton, mendeteksi adanya retak, melihat homogenitas beton, ketebalan pelat baja, cacat las, ketebalan cat, dan lain-lain.

Prinsip metode UPV didasarkan pada kecepatan gelombang suara yang melintasi sebuah benda dengan bergantung kepada sifat elastis dan kepadatan benda tersebut. Adapun cara kerja UPV yaitu, *transmitter* (*transducer* pengirim) mengirimkan

gelombang ultrasonik melewati benda dan ditangkap oleh *receiver* (*transducer* penerima) yang terletak sejauh L meter dari *transmitter*.

Alat UPV menampilkan nilai waktu yang diperlukan oleh gelombang untuk melalui benda, yang disebut *travel time* (Δt). Dengan demikian, kecepatan gelombang dapat dihitung dengan panjang lintasan gelombang dalam satuan meter (L) dibagi waktu tempuh dalam satuan detik (Δt).



Gambar 2.1 Prinsip kerja penggunaan gelombang ultrasonik

Sumber: S. Hartono dan I. Akbar (2022)

NDT memiliki sejumlah keunggulan dalam inspeksi beton, terutama karena beton adalah material yang tidak mudah diuji secara destruktif tanpa merusak struktur. Keunggulan NDT dalam inspeksi beton meliputi:

- *Non-Destructive*: NDT tidak merusak atau menghancurkan beton yang sedang diuji, sehingga tidak mengganggu integritas struktural dan fungsi dari elemen beton tersebut.
- *Penyelidikan Mendalam*: NDT memungkinkan inspeksi yang mendalam dan detail tentang kondisi beton, termasuk deteksi keretakan, void, dan penyimpangan lainnya.

- Pemantauan Berkala: NDT dapat digunakan secara berkala untuk memantau perubahan kondisi beton seiring waktu tanpa memerlukan penghancuran atau perbaikan yang besar.
- Efisiensi Biaya: NDT sering lebih efisien biaya dibandingkan dengan pengujian destruktif, karena tidak memerlukan penggantian atau perbaikan yang mahal akibat kerusakan struktural.
- Keamanan Pekerja: Karena NDT tidak melibatkan penghancuran material, inspeksi beton dapat dilakukan tanpa risiko besar bagi pekerja atau lingkungan.

Non-destructive test bermakna bahwa pengujian beton dilakukan tanpa merusak benda uji tersebut. Pengujian ini dinilai lebih efisien karena dapat mengurangi adanya kegagalan struktur yang dapat terjadi karena dilakukannya *destructive test*, pada penelitian sebelumnya yang berjudul "Deteksi Cacat Pada Material Dengan Teknik Pengujian Tidak Merusak" membahas metode NDT dan didapatkan bahwasanya dalam melakukan pengujian NDT perlu diperhatikan diantaranya jenis material, jenis cacat, lokasi cacat dan ukuran cacat dari material tersebut agar dalam pengujian mendapatkan hasil yang optimal (Irwansyah, 2018). Biasanya *non-destructive test* digunakan untuk memeriksa bangunan eksisting yang akan dievaluasi. Dalam pelaksanaan pengujiannya, NDT memiliki berbagai macam metode. Untuk memeriksa kualitas beton struktural, metode yang sering digunakan adalah *Ultrasonic Testing* (UPV).

2.3 Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) Testing adalah salah satu metode *Non-Destructive Testing (NDT)* yang digunakan untuk memeriksa integritas dan kualitas beton atau bahan konstruksi lainnya. Metode ini mengukur kecepatan rambatan gelombang ultrasonik melalui material untuk mendeteksi keretakan, retakan, void, atau perubahan dalam struktur beton. UPV sangat berguna dalam inspeksi dan pemantauan struktur beton seperti jembatan, bangunan, pelat, dan elemen konstruksi lainnya.

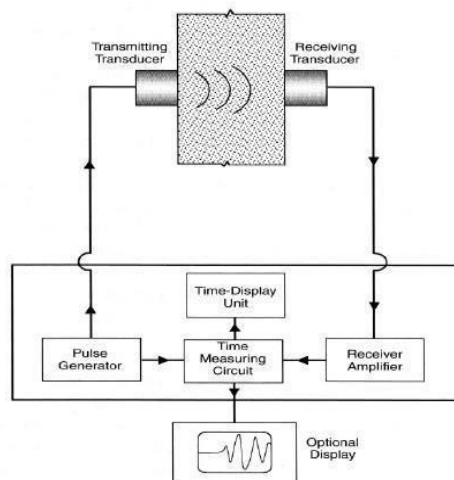
Metode kecepatan *pulse ultrasonic* atau UPV telah berhasil digunakan untuk mengevaluasi kualitas dari beton selama lebih dari 60 tahun. Metode ini dapat digunakan untuk mendeteksi retak *internal* dan cacat lainnya termasuk perubahan dari beton seperti penurunan kualitas beton akibat lingkungan kimia yang agresif atau pembekuan dan pencairan (V.M Malhotra & N.J Carino, 2004).

2.3.1 Sistem Kerja Alat

Alat *Ultrasonic Pulse Velocity* terdiri dari dua *transducer* yang mana masing-masingnya mempunyai fungsi sebagai *transmitter* dan *receiver*. Gelombang yang dihasilkan akan tersalurkan melalui *transmitter* yang selanjutnya merambat ke dalam beton dan gelombang tersebut akan diterima *receiver*. Kecepatan waktu tempuh gelombang ultrasonik merupakan hasil pembacaan dari pengujian ini yang diukur oleh alat *Portable Unit Non Destructive Indicator Tester (PUNDIT)* dalam satuan *micro second*.

Alat pengujian UPV terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu :

- a. Sepasang *transducer*, yaitu *transmitting transducer* dimana berfungsi mengolah gelombang listrik yang diubah menjadi gelombang *ultrasonic* dan selanjutnya merambatkannya, dan *receiving transducer* berfungsi sebagai penerima gelombang tersebut.
- b. Generator gelombang (*pulse generator*), dimana berisikan sirkuit penghasil gelombang listrik yang akan dikirimkan oleh *transmitter*.
- c. Pengukur waktu (*time measuring circuit*) memiliki fungsi untuk mencatat waktu transmisi gelombang yang melewati beton.
- d. Osiloskop merupakan layar tambahan sebagai pemantau perilaku osilasi atau vibrasi gelombang yang diterima oleh *receiver*.



Gambar 2.2 Diagram Skematik dan Instrumen UPV

Sumber: V.M Malhotra dan N.J Carino (2004)

Prinsip kerja pada alat *Ultrasonic Pulse Velocity* adalah dengan memberikan getaran gelombang *ultrasonik longitudinal* melalui *transduser elektro akustik*, yang merambat melalui *gel couplant* atau cairan pasta. Kegunaan dari *gel couplant* adalah untuk mencegah adanya rongga antara permukaan beton yang diuji dengan *transducer* supaya sinyal dari gelombang merambat dengan baik dan sempurna. Ketika perambatan gelombang melewati medium berbeda, yaitu permukaan beton dan *gel couplant*, sehingga akan menimbulkan pantulan gelombang yang merambat berupa gelombang longitudinal (*P-wave*) dan geser (*S-wave*). Arah rambatan gelombang longitudinal adalah sejajar lintasan sedangkan arah rambatan gelombang geser adalah tegak lurus lintasan. Gelombang longitudinal adalah gelombang pertama yang mencapai *receiver*. Kemudian *transducer* akan mengubah gelombang ini menjadi sinyal gelombang *elektro akustik* agar terdeteksi *receiver*, sehingga dapat terukur waktu tempuh gelombangnya (*transmission time*).

Waktu tempuh atau *T* yang diperlukan dalam perambatan gelombang pada lintasan beton sepanjang *L* dapat diketahui, dan cepat rambat gelombang dapat pula diketahui menggunakan Persamaan (2-1) (Lawson, 2011).

$$v = \frac{L}{T} \dots\dots\dots (2-1)$$

Dimana :

v = kecepatan rambat gelombang longitudinal (m/detik atau km/detik)

L = panjang lintasan beton yang dilalui (km atau m)

T = waktu tempuh gelombang longitudinal ultrasonik sepanjang lintasan L
(detik)

Hasil perhitungan tersebut juga dapat menginterpretasikan kualitas beton, antara lain :

- a) Homogenitas beton
- b) Mendeteksi rongga
- c) Mendeteksi keretakan
- d) Menentukan modulus elastisitas dinamis serta rasio poisson dinamis
- e) Mengidentifikasi kuat lentur beton
- f) Mengidentifikasi modulus elastisitas beton

2.3.2 Metode Pengujian

Pengukuran cepat rambat gelombang dapat dilakukan dengan 3 metode, antara lain:

1. Metode Langsung (*Direct Method*)

Pengujian dilaksanakan dengan cara meletakkan kedua *transducer* dengan arah berhadapan secara tegak lurus pada dua lapisan benda uji beton yang berseberangan. Panjang lintasan gelombang diukur dari jarak antara 2 sisi beton yang akan diuji. Apabila posisi *transducer* diletakkan benar-benar paralel, maka akan menghasilkan *transmisi* energi gelombang terbesar diantara lainnya. Oleh karena itu, hasil pengujian UPV menggunakan metode langsung akan memberikan hasil yang baik dan mendekati dengan keadaan aktualnya.

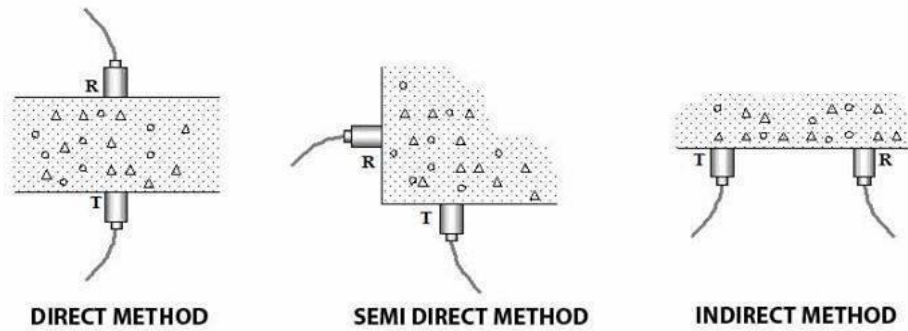
2. Metode Semi Langsung (*Semi-direct Method*)

Metode ini dilakukan dengan meletakkan kedua *transducer* saling tegak lurus pada kedua lapisan beton yang berbeda. Jarak miring dari *transmitter* dan *receiver* dapat diperoleh berdasarkan panjang lintasan gelombang ultrasonik. Cepat rambat pada metode ini tidak seakurat jika dibandingkan metode langsung, hanya saja masih dapat dinyatakan baik jika dari *transmitter* dan *receiver* diletakkan tidak terlalu jauh.

3. Metode Tidak Langsung (*Indirect Method*)

Metode tak langsung lebih sering digunakan saat berada di lapangan. Hal ini dikarenakan keterbatasan lokasi untuk melakukan pengujian, oleh karena itu hanya satu sisi dari beton yang mudah untuk dilakukan pengujian UPV. Metode ini dilakukan dengan meletakkan kedua *transducer* sejajar pada lapisan beton yang sama. Panjang lintasan gelombang ultrasonik dapat diketahui berdasarkan jarak dari *transmitter* dan *receiver*. Hasil yang didapatkan dari pengujian UPV menggunakan metode tidak langsung dapat dikatakan tidak sebaik kedua metode lainnya, karena jauh dari kuat tekan aktual apabila dibandingkan menggunakan metode *Compressive Test*. Jarak harus ditentukan terlebih dahulu jika menggunakan metode ini. Oleh karena itu, faktor pengali dibutuhkan untuk membuat hasil statistik dari metode ini mendekati hasil pengujian *direct method*.

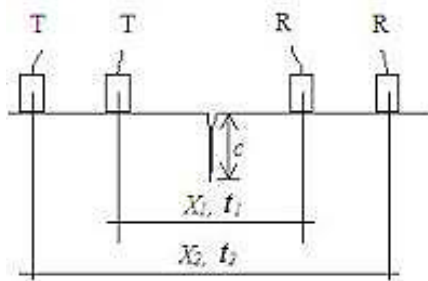
Untuk estimasi kedalaman keretakan metode yang digunakan adalah *Indirect Method* yang digunakan untuk mengukur waktu perambatan gelombang dari *transmitter* ke *receiver* pada satu bidang permukaan yang mana bila melewati garis keretakan terjadi loncatan waktu.



Gambar 2.3 Metode Pengujian Pada Tes UPV

Sumber: Anonim (2009)

Untuk mengetahui kedalaman keretakan dilakukan 2 (dua) kali pengukuran rambatan gelombang. Yang pertama adalah *transmitter* dan *receiver* diletakan berseberangan dalam satu bidang permukaan dengan jarak yang sama dari garis keretakan permukaan, yaitu pada jarak X_1 , dan selanjutnya pada jarak X_2 . Ilustrasi pengukuran seperti pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 Skema Pengujian Reta Beton dengan Alat Ultrasonik

Sumber: Anonim (2019)

Maka kedalaman retak dapat dihitung dengan persamaan (2-2) berikut:

$$C = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{X_2^2 T_1^2 - X_1^2 T_2^2}{T_2 - T_1}} \dots\dots\dots (2-2)$$

Dimana:

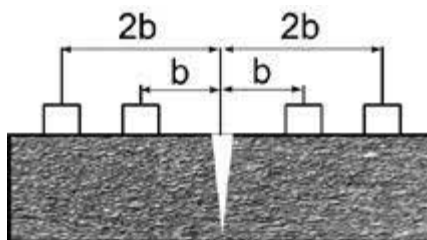
X1 = jarak antar *transducer* (*transmitter* dan *receiver*) pada pengukuran pertama

X2 = jarak antar *transducer* (*transmitter* dan *receiver*) pada pengukuran kedua

T1 = waktu yang perambatan gelombang dari *transmitter* ke *receiver* pada pengamatan pertama

T2 = waktu yang perambatan gelombang dari *transmitter* ke *receiver* pada pengamatan kedua

Jika pada pengukuran pertama jarak antara posisi retak dengan *transmitter* adalah *b*, dan jarak antara *receiver* dengan posisi retak juga *b* dengan arah yang berlawanan, maka X1 = 2*b*.



Gambar 2.5 Skema Pengujian Reta Beton dengan Alat Ultrasonik

Sumber: Anonim (2019)

Dan persamaan (2-2) sebelumnya akan menjadi persamaan (2-3) berikut:

$$c = b \sqrt{\frac{4T_1^2 - T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}} \dots\dots\dots (2-3)$$

Keterangan :

c : estimasi kedalaman retak

b : jarak dari garis retak ke transducer pemancar dan transducer penerima

T1 : waktu rambat gelombang pada pengukuran pertama

T2 : waktu rambat gelombang pada pengukuran kedua

2.4 Gelombang Mekanik

Gelombang mekanik merupakan gelombang yang dalam perambatannya membutuhkan medium untuk menyalurkan energi dalam proses penjalaran sebuah gelombang. Media yang bisa digunakan berupa zat padat, zat cair, maupun gas.

Menurut arah getarnya, gelombang mekanik dibagi menjadi dua jenis :

1. Gelombang Longitudinal

Arah getar gelombangnya sejajar arah rambat gelombangnya. Karakteristik gelombang ini adalah adanya rapatan dan regangan pada gelombang. Menurut frekuensinya, gelombang longitudinal dibedakan menjadi gelombang infrasonik, gelombang audiosonik, dan gelombang ultrasonik seperti yang dapat dilihat pada Tabel

2.1

Tabel 2.1 Jenis Gelombang Mekanik Longitudinal berdasarkan Frekuensi

Jenis Gelombang	Frekuensi	Keterangan
Infrasonik	< 20 Hz	Didengar jangkrik dan anjing
Audiosonik	20 - 20.000 Hz	Didengar manusia
Ultrasonik	> 20.000 Hz	Didengar kelelawar

Sumber: International Atomic Energy Agency, 2002)

2. Gelombang Transversal

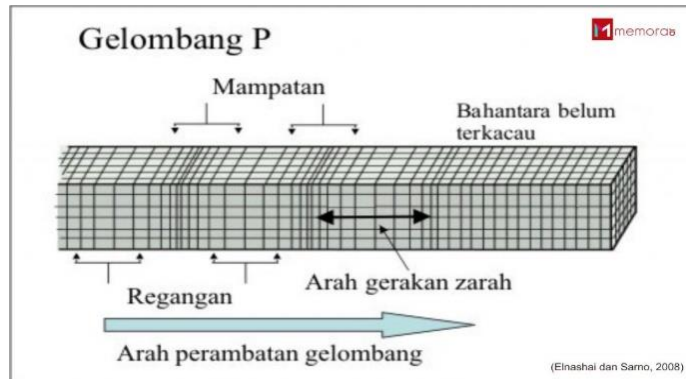
Arah getar dari gelombang transversal adalah tegak lurus terhadap arah rambat gelombangnya. Karakteristik pada gelombang ini adalah adanya lembah dan puncak gelombang. Gelombang mekanik menyalurkan energi pada partikel dalam medium rambatnya, sehingga dalam perambatannya terjadi pergerakan dan interaksi antar partikel. Oleh karena itu, akan timbul gelombang mekanis ketika suatu permukaan dari media padat elastik yang besar diberikan beban dinamis maupun getaran.

Gelombang mekanik memiliki 3 jenis gelombang, diantaranya adalah :

1) Gelombang Primer (*P-wave*)

Dapat disebut juga dengan *Push-Pull Wave* atau *Compressional Wave*. Perambatan gelombang ini terjadi terlebih dahulu sebelum gelombang sekunder. Pada gelombang ini partikel berosilasi maju dan mundur dari titik ekuilibriumnya. Gelombang primer akan merambat pada kecepatan tertentu yang mana didasarkan pada kekerasan atau kerapatan medium yang dilaluinya. Nilai kecepatan rambat gelombang akan semakin cepat apabila melalui medium yang lebih padat (keras). Semakin cepat

rambat gelombangnya, maka amplitudo (simpangan) akan semakin kecil. Gelombang ini dapat merambat melalui segala jenis medium, baik padat, cair, maupun gas. *P-wave* merupakan gelombang longitudinal

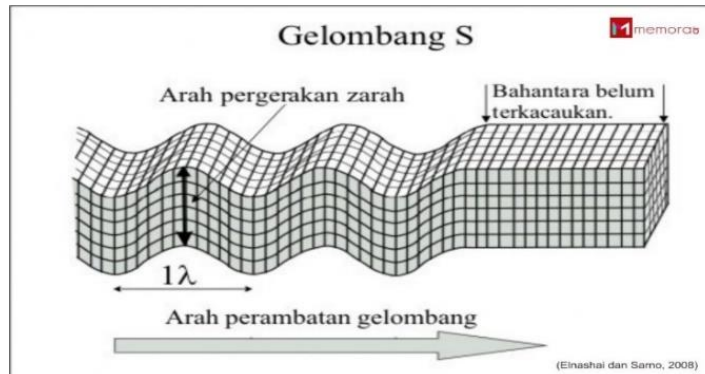


Gambar 2.6 Pergerakan Partikel Pada Gelombang Primer (*P-Wave*)

Sumber: Elnashai dan Samo (2008)

2) Gelombang Sekunder (*S-wave*)

Merupakan gelombang yang muncul setelah gelombang primer. Termasuk ke dalam jenis gelombang transversal yang mana menimbulkan tegangan geser karena partikelnya berosilasi searah tegak lurus terhadap arah rambatnya. Karena merambat melalui medium ruang, gelombang ini juga diklasifikasikan menjadi gerak horizontal (SH) dan gerak vertikal (SV). Cepat rambat gelombang tidak secepat gelombang primer dan tidak dapat merambat melalui medium zat cair.

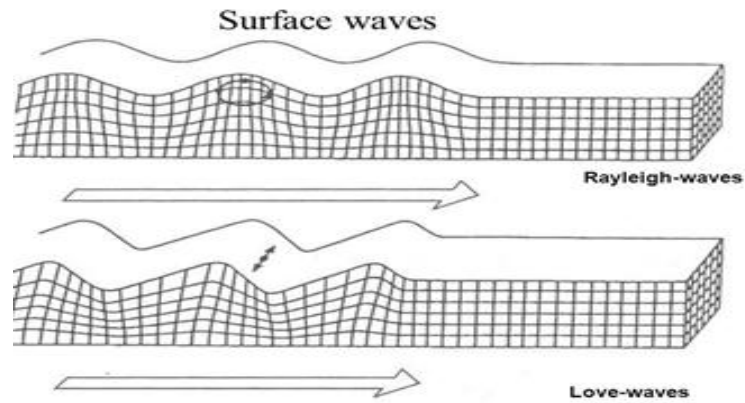


Gambar 2.7 Pergerakan Partikel pada Gelombang Sekunder (S-wave)

Sumber: Elnashai dan Samo (2008)

3) Gelombang Permukaan (*Surface Wave*)

Gelombang yang merambat melewati permukaan medium dan amplitudonya akan semakin kecil jika perambatan gelombangnya semakin menjauhi permukaan. Gelombang permukaan merambat lebih lambat dan frekuensinya lebih rendah dari gelombang badan (*P-wave* dan *S-wave*), tetapi memiliki amplitudo yang lebih besar. Gelombang ini lebih banyak terjadi pada gelombang yang memiliki frekuensi di bawah 500 kHz. Terdapat 2 jenis gelombang permukaan, yaitu *Love Wave* dan *Rayleigh Wave*. *Love Wave* adalah gelombang yang merambat hanya pada lapisan permukaan saja yang mana serupa dengan gelombang transversal namun bergerak hanya pada bidang horizontal. Sedangkan *Rayleigh Wave* memiliki gerakan partikel yang *eliptik retrograde*, yaitu bergerak menggulung medium yang dilalui dan terlihat seperti gerakan gelombang air di laut.



Gambar 2.8 Pergerakan Partikel pada Gelombang Permukaan: Love Wave dan Rayleigh Wave

Sumber: Aletheia R. (2022)

2.5 Perambatan Gelombang

Setiap jenis gelombang mempunyai karakteristik cepat rambat yang berbeda – beda. Seperti contohnya, pada benda padat, gelombang primer merambat paling cepat sedangkan yang paling lambat adalah gelombang permukaan. Pada beton, menurut ASTM, kecepatan rambat *S-wave* dan *surface wave* berturut – turut adalah 60% dan 55% dari kecepatan rambat *P-wave*.

Kecepatan rambat gelombang dipengaruhi oleh sifat elastis dan kerapatan dari mediumnya. Pada medium padat elastis yang homogen, cepat rambat *P-wave* menjadi persamaan (2-4) berikut:

$$V = \sqrt{\frac{K.E}{\rho}} \dots\dots\dots (2-4)$$

dimana :

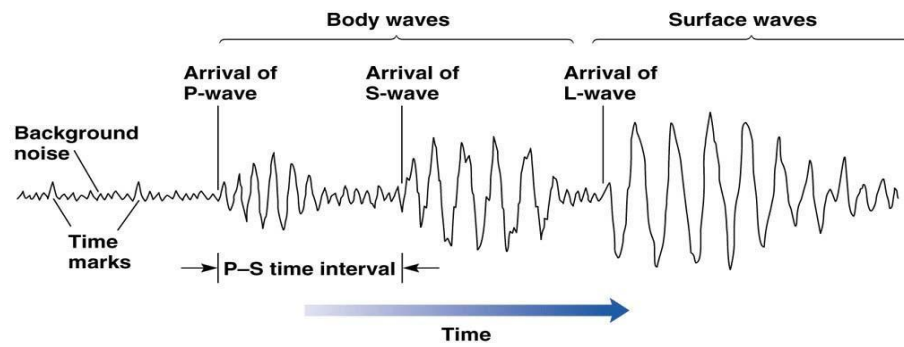
V = kecepatan rambat

$$K = \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}$$

E = modulus elastis dinamis

ρ = kerapatan beton

μ = poisson ratio dinamis



Gambar 2.9 Perambatan Gelombang pada Alat Pembaca Gelombang

Sumber: Brooks/Cole – Thomson Learning (2001)

Interval pada variasi K bernilai sangat kecil, yaitu sekitar 1,06 hingga 1,20. Namun, variasi pada nilai E dan ρ dapat memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai V . Biasanya kecepatan rambat gelombang (V) beton adalah pada interval 3000 sampai 5000 m/s.

Pada saat bagian yang mempunyai sifat material tidak sama ditemukan oleh perambatan gelombang, sebagian energinya menyebar luas dari lintasan awal gelombang.

Semisal terdapat kerusakan beton seperti adanya keretakan maka akan mengakibatkan beberapa energi gelombang kompresi tersebar dari lintasan awal gelombang tersebut. Besaran tingkat penyebaran dapat semakin bertambah jika besarnya panjang gelombang yang merambat lebih rendah atau sama seperti ukuran bagian penyebarannya, dimana menyebabkan gelombang mengalami redaman yang lebih cepat. Penggunaan frekuensi pada beton tidak boleh lebih dari 500 kHz yang mana terkait dengan panjang gelombang berkisar 10 mm.

Tabel 2.2 Kualifikasi Kualitas Beton berdasarkan Cepat Rambat

Cepat Rambat Gelombang Longitudinal		Kualitas
<u>Km/ detik</u>	<u>Ft/ detik</u>	
> 4,5	> 15	Sangat Baik
3,5 - 4,5	12 - 15	Baik
3,0 - 3,5	10 - 12	Diragukan
2,0 - 3,0	7 - 10	Jelek
< 2,0	< 7	Sangat Jelek

Sumber : International Atomic Energy Agency (2002)

2.6 Hubungan Keretakan Beton Dengan Cepat Rambat Gelombang

Keretakan beton dan cepat rambat gelombang ultrasonik memiliki hubungan yang erat dalam konteks pengujian beton menggunakan metode *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) atau pengujian ultrasonik serupa. Cepat rambat gelombang ultrasonik dalam beton dapat mempengaruhi kemampuan kita untuk mendeteksi dan mengevaluasi keretakan.

Dalam pengujian UPV, sinyal ultrasonik dihasilkan oleh pemancar dan kemudian ditangkap oleh penerima. Kecepatan perambatan gelombang ultrasonik

diukur berdasarkan waktu yang diperlukan untuk gelombang tersebut untuk mencapai penerima. Cepat rambat gelombang ultrasonik dalam beton dapat bervariasi berdasarkan sifat-sifat fisik beton, termasuk kepadatan, kelembaban, dan kondisi internal lainnya.

Keretakan dalam beton biasanya menghasilkan variasi dalam cepat rambat gelombang ultrasonik. Ketika gelombang ultrasonik mencapai keretakan, refleksi, atau perubahan dalam kecepatan rambat gelombang bisa terjadi. Ini dapat terdeteksi selama pengujian UPV. Keretakan yang lebih dalam atau lebih serius biasanya akan menghasilkan perubahan yang lebih signifikan dalam cepat rambat gelombang.

Pengujian UPV dapat digunakan untuk mendeteksi keretakan dalam beton. Jika ada keretakan yang cukup besar atau cukup dalam untuk mempengaruhi perambatan gelombang ultrasonik, ini dapat dilihat sebagai perubahan dalam data UPV. Selanjutnya, analisis data ini dapat membantu peneliti untuk mengevaluasi lokasi, panjang, dan seriusnya keretakan.

2.7 Prinsip Analisa Bentuk Gelombang (*Waveform*)

Sensor ultrasonik adalah sebuah sensor yang memiliki fungsi untuk mengubah besaran fisis atau bunyi menjadi besaran listrik dan juga sebaliknya.

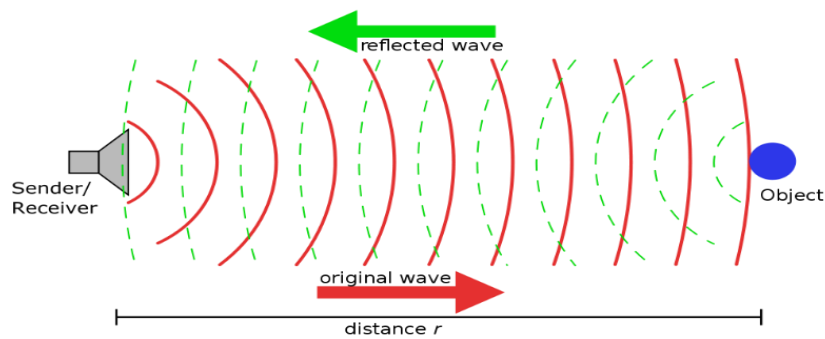


Gambar 2.10 Bentuk Sensor Ultrasonik HC-SR04

Sumber: S. Hartono dan I. Akbar (2022)

Cara kerja pada sensor ini adalah dengan cara pantulan suatu gelombang suara yang dapat digunakan untuk menafsirkan eksistensi atau jarak suatu benda menggunakan frekuensi tertentu. Sensor ini menggunakan gelombang ultrasonik (bunyi ultrasonik) dalam mendeteksi suatu jarak benda.

Gelombang ultrasonik dapat merambat melalui zat padat, cair dan gas. Reflektivitas bunyi ultrasonik pada permukaan zat padat hampir sama dengan reflektivitas bunyi ultrasonik pada permukaan zat cair. Cara kerja sensor ultrasonik adalah:



Gambar 2.11 Cara Kerja Sensor Ultrasonik dengan Transmitter dan Receiver

Sumber: S. Hartono dan I. Akbar (2022)

Pada sensor ultrasonik ini gelombang ultrasonik dibangkitkan melalui sebuah alat yang disebut dengan *piezoelektrik* dengan frekuensi tertentu. Piezoelektrik dapat menghasilkan gelombang ultrasonik (umumnya berfrekuensi 40 kHz) ketika sebuah osilator diterapkan pada benda tersebut.

Secara umum, alat ini akan menembakkan gelombang ultrasonik menuju suatu media/target. Setelah gelombang menyentuh permukaan target, maka target akan memantulkan kembali gelombang tersebut. Gelombang pantulan dari target selanjutnya ditangkap oleh sensor.

Kemudian sensor akan menghitung selisih antara waktu pengiriman gelombang dan waktu gelombang pantul diterima. Ketika gelombang ultrasonik melewati media dengan sifat material yang berbeda, sebagian energi dari gelombang tersebut akan tersebar dari lintasan awal gelombang.

Misalnya, dengan adanya rongga, retak, atau partikel agregat yaitu bahan-bahan mineral tidak bergerak, misalnya pasir, debu, batu, kerikil, pecahan batu yang bercampur semen, kapur, atau bahan aspal untuk mengikat campuran tersebut dalam beton akan menyebarkan sebagian energi gelombang kompresi dari lintasan awal gelombang tersebut.

Tingkat penyebaran akan bertambah jika panjang gelombang yang merambat bernilai lebih kecil atau sama dengan ukuran bagian penyebarannya.

Saat gelombang ultrasonik merambat melalui media yang berbeda, contohnya couplant (sebagai media di antara transduser dengan benda uji) dan beton, maka pada batas couplant dan beton akan terjadi pantulan gelombang yang merambat dalam bentuk gelombang longitudinal (P-wave) dan gelombang geser (S-wave), yakni gelombang geser merambat tegak lurus lintasan, sedangkan gelombang longitudinal merambat sejajar lintasan sebagai gelombang yang pertama kali mencapai transduser penerima.

Kemudian gelombang tersebut diubah menjadi sinyal elektronik oleh transduser penerima, sehingga waktu tempuh gelombang dapat diukur.

2.8 Penelitian Terdahulu

Dalam melakukan penelitian ini, penulis membutuhkan beberapa acuan, salah satunya adalah dari penelitian terdahulu. Mengacu pada hasil penelitian terdahulu, dapat diketahui beberapa kelebihan dan kekurangannya sehingga dapat dijadikan referensi sebagai tambahan bahan kajian pustaka pada penulisan ini. Berikut uraian singkat terkait hasil penelitian terdahulu yang digunakan dalam penyusunan penelitian ini.

No.	Nama Peneliti, Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1.	Teguh Dwi Saputra, Sugeng P. Budio, Indra Waluyohadi (2018)	Investigasi Rongga dan Kedalaman Retak Pada Balok Beton Dengan UPE Dan UPV	<ol style="list-style-type: none"> 1. Alat UPE dapat secara akurat dan konsisten dalam melakukan pembacaan rongga di dalam beton. Faktor human error dan inhomogenitas dalam beton dapat mempengaruhi hasil pembacaan alat UPE. 2. Alat UPV dapat secara akurat dan konsisten dalam melakukan pembacaan kedalaman retak. Faktor penggambaran retak yang tidak sempurna dan jarak antar retak yang terlalu dekat dapat mempengaruhi hasil pembacaan alat UPV.
2.	Dewi Linggasari (2019)	Memperkirakan Kedalaman Retak Pada Beton Menggunakan Gelombang Ultrasonik	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pengukuran kedalaman keretakan pada elemen struktur beton, dilakukan dengan metode yang mengacu pada standard BS 1881 bagian 203 dan buku manual

			<p>petunjuk penggunaan alat PUNDIT.</p> <p>2. Kedua metode yang digunakan tidak menunjukkan perbedaan hasil kedalaman keretakan yang signifikan.</p> <p>3. Kedalaman keretakan yang terjadi pada beton berpengaruh pada metode perbaikan yang akan dilakukan pada elemen struktur tersebut.</p>
3.	Dyah Sulistyani R, Sumaryanto (2010)	Pendeteksian Kedalaman Retak Beton Menggunakan Metode Ultrasonik	Keretakan beton sangat bervariasi tergantung dari kelemahan struktur beton tersebut, karena sifat air selalu mencari celah/jalan untuk bisa mengalir. Penurunan kualitas beton pada bangunan sangat dipengaruhi oleh beban, iklim, cuaca dan lingkungan. Dengan adanya hasil kedalaman retak dan posisi keretakan beton, maka akan ditentukan metode yang sesuai untuk perbaikan lebih lanjut, yaitu dengan teknik crack injection.
4.	Chiristin R. Nainggolan, Siti Nurlina, Edhi Wahyuni, Naufal R. R. (2021)	Analisa Hasil Pembacaan Retak Lurus dan Miring Pada Beton Dengan Menggunakan Metode NDT (<i>Non Destructive Test</i>)	Semakin kecil sudut kemiringan retak maka akan semakin tidak valid pembacaan kedalaman retak