

SKRIPSI

**KUAT TEKAN DAN KECEPATAN GELOMBANG
ULTRASONIK PADA BETON DENGAN LIMBAH BATU
BATA TAHAN API SEBAGAI MATERIAL PENGGANTI
PARSIAL AGREGAT KASAR**

Disusun dan diajukan oleh:

**JUNAEDI KALA
D011 19 1076**



**PROGRAM STUDI SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

i

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

KUAT TEKAN DAN KECEPATAN GELOMBANG ULTRASONIK PADA BETON DENGAN LIMBAH BATU BATA TAHAN API SEBAGAI MATERIAL PENGGANTI PARSIAL AGREGAT KASAR

Disusun dan diajukan oleh

JUNAEDI KALA
D011 19 1076

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 5 Juli 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng
NIP 196805292002121002

Pembimbing Pendamping,



Dr.Eng. Muhammad Akbar Caronge, ST, M.Eng
NIP 198604092019043001

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng
NIP 196805292002121002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Junaedi Kala
NIM : D011191076
Program Studi : Teknik Sipil
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{KUAT TEKAN DAN KECEPATAN GELOMBANG ULTRASONIK PADA
BETON DENGAN LIMBAH BATU BATA TAHAN API SEBAGAI
MATERIAL PENGGANTI PARSIAL AGREGAT KASAR}

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

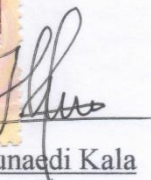
Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 6 Februari 2023

Yang Menyatakan




Junaedi Kala

ABSTRAK

JUNAEDI KALA. *Kuat Tekan dan Kecepatan Gelombang Ultrasonik pada Beton dengan Limbah Batu Bata Tahan Api sebagai Material Pengganti Parsial Agregat Kasar* (dibimbing oleh Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, S.T., M.T. dan Dr. Eng. M. Akbar Caronge, S.T., M.T.)

Masalah yang dihadapi oleh setiap negara di dunia semakin hari semakin kompleks. Permasalahan utama di Indonesia sendiri masih saja terkait pembangunan konstruksi berkelanjutan di berbagai daerah yang masih belum merata. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik Nasional (BPSN), pada September 2020 jumlah penduduk Indonesia sebesar 270,20 juta jiwa, dimana terdapat peningkatan 32,56 juta jiwa dari tahun 2010. Hal ini menyebabkan bertambahnya kebutuhan untuk perumahan yang layak dan berkelanjutan. Selain itu, kebutuhan tersebut seiring dengan efisiensi biaya dalam konstruksi. Sehingga pemanfaatan material limbah daur ulang dalam campuran material beton sangat dibutuhkan saat ini. Terdapat sekitar 4500 ton limbah batu bata tahan api atau sekitar 150 m³ yang dihasilkan dari tungku pembakaran PT. Vale Indonesia. Untuk itu, perlu adanya penelitian terkait penggunaan limbah dalam pembuatan beton. Tujuan dari penelitian ini ialah untuk memperoleh campuran dengan persentase terbaik dalam pembuatan beton dengan nilai kuat tekan dan kecepatan rambat gelombang yang termasuk kualitas baik. Metode yang digunakan dalam penelitian ini ialah dengan melakukan studi pustaka lalu mengambil data dari laboratorium dengan cara pemeriksaan dan pengujian benda uji yang dilakukan berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI). Pengujian yang dilakukan yaitu pengujian kuat tekan dan pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*. Dari pengujian yang telah dilakukan diperoleh hasil bahwa beton dengan persentase campuran 15% *Refractory Brick Converter* memiliki kuat tekan yang memenuhi kuat tekan rencana baik untuk variasi 21 dan 25 MPa. Selain itu, semua beton dengan campuran batu bata tahan api memiliki nilai kecepatan rambat gelombang (UPV) dengan kualitas yang baik. Sehingga limbah batu bata tahan api (*Refractory Brick*) dapat digunakan sebagai material parsial pengganti agregat kasar pada beton.

Kata Kunci: limbah, agregat kasar, batu bata tahan api, kuat tekan, kecepatan rambat gelombang

ABSTRACT

JUNAEDI KALA. *Compressive Strength and Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Using Refractory Brick Waste as a Partial Replacement of Coarse Aggregate* (supervised by Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, S.T., M.T. and Dr. Eng. M. Akbar Caronge, S.T., M.T.)

Every country in the globe is now dealing with difficulties that are getting more and more complicated. The fundamental issue in Indonesia itself still has to do with inconsistent sustainable construction throughout diverse areas. According to information from the Badan Pusat Statistik Nasional (BPSN), there were 270.20 million people living in Indonesia as of September 2020, a rise of 32.56 million from 2010. As a result, there is now a greater demand for affordable, sustainable housing. Additionally, this requirement is consistent with building cost effectiveness. Therefore, it is currently urgently necessary to incorporate recycled waste materials in a mixture of concrete components. There are around 150 m³ or 4500 tons of leftover refractory bricks from PT. Vale Indonesia. It is vital to do research on the usage of waste in the production of concrete because of this. In order to produce concrete with high compressive strength and wave velocity values, this research aims to find the combination with the optimal proportion. This study's methodology involved doing a literature review before retrieving data from the lab by evaluating and testing test objects in accordance with the Indonesian National Standard (SNI). Compressive strength testing and Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) testing were performed. According to the findings of the tests that were done, concrete that contains 15% of a mixture of Refractory Brick Converter has a compressive strength that is sufficient for both 21 and 25 MPa variations. Additionally, the wave propagation velocity of every concrete blended with refractory bricks is of high quality (UPV). To enable the partial replacement of coarse aggregate in concrete by discarded refractory bricks.

Keywords: waste, coarse aggregate, refractory brick, compressive strength, ultrasonic pulse velocity

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
KATA PENGANTAR	x
BAB I PENDAHULUAN.....	11
1.1 Latar Belakang	11
1.2 Rumusan Masalah.....	12
1.3 Tujuan Penelitian	13
1.4 Manfaat Penelitian	13
1.5 Ruang Lingkup Penelitian.....	13
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	15
2.1 Penelitian Terdahulu	15
2.2 Beton	18
2.3 Material Penyusun Beton	24
2.4 Pengujian Kuat Tekan.....	30
2.5 Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)</i>	33
BAB III METODE PENELITIAN.....	36
3.1 Bagan Alir Penelitian	36
3.2 Waktu dan Lokasi Penelitian	37
3.3 Jenis Penelitian dan Sumber Data	38
3.4 Alat dan Bahan Penelitian.....	38
3.5 Pemeriksaan Karakteristik Material.....	39
3.6 Standar Pengujian Beton Segar.....	41
3.7 Pembuatan Benda Uji.....	41
3.8 Perawatan (<i>Curing</i>) Benda Uji.....	42
3.9 Standar Pengujian Beton.....	43
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	46
4.1 Pengujian Karakteristik Material	46
4.2 Rancangan Campuran (<i>Mix Design</i>)	51
4.3 Pengujian Kuat Tekan.....	51
4.4 Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)</i>	56
4.5 Hubungan Kuat Tekan dan <i>Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)</i>	59
4.6 Hubungan Kuat Tekan dan Berat Jenis.....	64
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	68
5.1 Kesimpulan	68
5.2 Saran.....	69
DAFTAR PUSTAKA	70

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Skematik Pengujian UPV	35
Gambar 2 Bagan Alir Penelitian	37
Gambar 3 Material Beton.....	39
Gambar 4 Perawatan (<i>Curing</i>) Benda Uji.....	43
Gambar 5 Pengujian Kuat Tekan	44
Gambar 6 Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)</i>	45
Gambar 7 Gradasi Agregat Halus (Pasir).....	47
Gambar 8 Gradasi Batu Pecah dengan Perbandingan 70:30.....	47
Gambar 9 Gradasi <i>RB Converter</i> dan <i>RB Furnace Roof</i>	50
Gambar 10 Hasil Pengujian Kuat Tekan Sampel <i>RB Converter</i> 21 MPa.....	52
Gambar 11 Hasil Pengujian Kuat Tekan Sampel <i>RB Converter</i> 25 MPa.....	52
Gambar 12 Hasil Pengujian Kuat Tekan Sampel <i>RB Furnace Roof</i> 21 MPa.....	53
Gambar 13 Hasil Pengujian Kuat Tekan Sampel <i>RB Furnace Roof</i> 25 MPa.....	53
Gambar 14 Hasil Pengujian Kuat Tekan Sampel <i>RB Furnace Sidewall</i> 21 MPa	54
Gambar 15 Hasil Pengujian Kuat Tekan Sampel <i>RB Furnace Sidewall</i> 25 MPa	55
Gambar 16 Hasil Pengujian UPV Sampel <i>RB Converter</i> 21 MPa.....	56
Gambar 17 Hasil Pengujian UPV Sampel <i>RB Converter</i> 25 MPa.....	56
Gambar 18 Hasil Pengujian UPV Sampel <i>RB Furnace Roof</i> 21 MPa.....	57
Gambar 19 Hasil Pengujian UPV Sampel <i>RB Furnace Roof</i> 25 MPa.....	57
Gambar 20 Hasil Pengujian UPV Sampel <i>RB Furnace Sidewall</i> 21 MPa.....	58
Gambar 21 Hasil Pengujian UPV Sampel <i>RB Furnace Sidewall</i> 25 MPa.....	58
Gambar 22 Hubungan Kuat Tekan dan Kecepatan Gelombang Ultrasonik Sampel Normal 21 MPa	60
Gambar 23 Hubungan Kuat Tekan dan Kecepatan Gelombang Ultrasonik Sampel Normal 25 MPa	60
Gambar 24 Hubungan Kuat Tekan dan Kecepatan Gelombang Ultrasonik Sampel 15 <i>RB Converter</i> 21 MPa	61
Gambar 25 Hubungan Kuat Tekan dan Kecepatan Gelombang Ultrasonik Sampel 15 <i>RB Converter</i> 25 MPa	61
Gambar 26 Hubungan Kuat Tekan dan Kecepatan Gelombang Ultrasonik Sampel 30 <i>RB Converter</i> 21 MPa	62
Gambar 27 Hubungan Kuat Tekan dan Kecepatan Gelombang Ultrasonik Sampel 30 <i>RB Converter</i> 25 MPa	62
Gambar 26 Hubungan Kuat Tekan dan Kecepatan Gelombang Ultrasonik Sampel 50 <i>RB Converter</i> 21 MPa	63
Gambar 27 Hubungan Kuat Tekan dan Kecepatan Gelombang Ultrasonik Sampel 50 <i>RB Converter</i> 25 MPa	63
Gambar 28 Hubungan Kuat Tekan dan Berat Jenis Sampel <i>RB Converter</i> 21 MPa	64
Gambar 29 Hubungan Kuat Tekan dan Berat Jenis Sampel <i>RB Converter</i> 25 MPa	64
Gambar 30 Hubungan Kuat Tekan dan Berat Jenis Sampel <i>RB Furnace Roof</i> 21 MPa	65

Gambar 31 Hubungan Kuat Tekan dan Berat Jenis Sampel <i>RB Furnace Roof</i> 25 MPa	65
Gambar 32 Hubungan Kuat Tekan dan Berat Jenis Sampel <i>RB Furnace</i> <i>Sidewall</i> 21 MPa.....	66
Gambar 33 Hubungan Kuat Tekan dan Berat Jenis Sampel <i>RB Furnace</i> <i>Sidewall</i> 25 MPa.....	66

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Syarat Kimia Utama Semen Portland	25
Tabel 2 Syarat Fisika Utama Semen Portland.....	26
Tabel 3 Batas Gradasi Agregat Halus	27
Tabel 4 Batas Gradasi Agregat Kasar	28
Tabel 5 Jenis <i>Refractory Brick</i>	30
Tabel 6 Standar Pemeriksaan Karakteristik Agregat Halus	39
Tabel 7 Standar Pemeriksaan Karakteristik Agregat Kasar	40
Tabel 8 Standar Pemeriksaan <i>Refractory Brick</i>	40
Tabel 9 Variasi benda Uji	41
Tabel 10 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Halus (Pasir)	46
Tabel 11 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Kasar (Batu Pecah)	48
Tabel 12 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Kasar Parsial (<i>Refractory Brick</i>).....	49
Tabel 13 Komposisi Campuran Beton 21 MPa dan 25 MPa	51

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Dokumentasi Penyiapan Material.....	71
Lampiran 2. Dokumentasi Pembuatan Benda Uji.....	72
Lampiran 3. Dokumentasi Perawatan Benda Uji.....	73
Lampiran 4. Dokumentasi Pengujian Benda Uji.....	74
Lampiran 5. Hasil Pengujian Kuat Tekan.....	75
Lampiran 6. Hasil Pengujian Ultrasonic <i>Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)</i>	77

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Segala puji atas ke hadirat Allah ﷻ yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, Salawat serta salam selalu tercurahkan kepada محمد ﷺ dan semoga kita semua mendapat syafa'atnya di hari akhir. Alhamdulillah, penulis ucapkan karena dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “Kuat Tekan dan Kecepatan Gelombang Ultrasonik pada Beton dengan Limbah Batu Bata Tahan Api sebagai Material Parsial Pengganti Agregat Kasar” yang merupakan salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi S1 Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Dalam penyusunan tugas akhir ini, tentu ada hambatan yang harus penulis hadapi. Namun, dibalik itu ada pihak yang telah membantu dan mendukung penyusunan tugas akhir ini. Sehingga tak lupa penulis menyampaikan terima kasih kepada pihak yang telah memberi bantuan serta dukungan baik berupa tenaga maupun pemikirannya. Tak lupa pula penulis mengucapkan terima kasih kepada bapak Prof. Dr. H. M Wihardi Tjaronge, S.T., M.T. dan bapak Dr. Eng. M. Akbar Caronge, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan kontribusi waktu dan tenaga untuk membantu menyelesaikan penyusunan tugas akhir ini.

Penulis tentu menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna karena mungkin saja terdapat kesalahan serta kekurangan di dalamnya. Oleh karena itu, penulis menerima kritik serta saran dari pembaca agar nantinya dapat menjadi tugas akhir yang lebih baik di masa yang akan datang.

Gowa, 31 Januari 2023

Penulis

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Masalah yang dihadapi oleh setiap negara di dunia semakin hari semakin kompleks. Permasalahan utama di Indonesia sendiri masih saja terkait pembangunan konstruksi berkelanjutan di berbagai daerah yang masih belum merata. Sebagai salah satu negara yang turut menyepakati rencana aksi global yakni Sustainable Development Goals (SDGs) yang diharapkan tercapai pada tahun 2030. Tentu saja hal ini menjadi sorotan utama karena pada tujuan ke-11 yakni “Kota dan Permukiman yang Berkelanjutan” masih belum dapat direalisasikan oleh Indonesia sendiri. Dalam mewujudkan tujuan ke-11 dari SDGs tersebut diperlukan pembangunan berkelanjutan dari perkotaan dan permukiman di Indonesia, salah satunya ialah perlu adanya material pembangunan konstruksi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik Nasional (BPSN), pada September 2020 jumlah penduduk Indonesia sebesar 270,20 juta jiwa, dimana terdapat peningkatan 32,56 juta jiwa dari tahun 2010. Hal ini menyebabkan bertambahnya kebutuhan untuk perumahan yang layak dan berkelanjutan untuk setiap penduduk di Indonesia yang akan berdampak pada meningkatnya pembangunan konstruksi di Indonesia. Hingga saat ini pembangunan konstruksi di Indonesia terus terjadi peningkatan sebesar 7% per tahun yang didorong oleh proyek-proyek energi dan rumah tinggal serta investasi infrastruktur di berbagai kota di Indonesia. Disamping itu, Indonesia yang termasuk salah satu negara berkembang dengan berbagai industri tambang yang masih beroperasi yang tidak hanya menghasilkan dampak positif namun juga negatif terhadap lingkungan seperti halnya limbah salah satunya batu bata tahan api dari pembongkaran tungku pembakaran di perusahaan tambang di Indonesia. Menurut data Kementerian ESDM, pada tahun 2019 terdapat 292 IUP (Izin Usaha Pertambangan) operasi produksi perusahaan tambang yang masih beroperasi di Indonesia yang menghasilkan limbah dan berpartisipasi dalam terjadinya *global warming* yang mengakibatkan suhu permukaan bumi semakin naik sepanjang tahun yang akan berdampak buruk bagi kemaslahatan makhluk hidup di bumi.

Dalam dunia pertambangan, refraktori merupakan batu bata tahan api yang digunakan sebagai insulator panas. Refraktori bekas dihasilkan oleh semua unit pabrik pengolahan (*dryer, reduction kiln, furnace dan converter*) refraktori paling sering dihasilkan secara berkala selama proses pemeliharaan setiap bulan untuk unit converter. Terdapat sekitar 4500 ton per tahun limbah batu bata tahan api yang dihasilkan dari tungku pembakaran di PT. Vale Indonesia. Dan terdapat sekitar 150 m³ limbah yang dihasilkan dari pembongkaran kiln di PT. Vale Indonesia pada tahun 2022. Penggunaan limbah sebagai bahan pengganti agregat sangat diperlukan di era ini karena perlunya pembangunan konstruksi yang berkelanjutan dengan tetap memperhatikan efisiensi dari segi biaya serta pengaruhnya terhadap lingkungan.

Dalam pembangunan konstruksi diperlukan biaya yang lebih efisien dalam anggarannya. Material pembangunan merupakan item dengan biaya terbesar dalam sebuah proyek salah satunya ialah beton. Dalam *World Economic Forum (2021)*, berbagai negara di dunia seperti Belanda, Swiss, Jerman, Perancis, dan Inggris sepakat untuk menggunakan beton ramah lingkungan yang dapat membantu memperbaiki kerusakan lingkungan yang telah terjadi. Penggunaan beton ramah lingkungan ini juga diiringi dengan evaluasi kekuatan tekan yang dihasilkan. Maka dari itu, perlunya rancangan campuran beton yang mengandung material daur ulang yaitu batu bata tahan api sebagai agregat kasar yang dapat memiliki kuat tekan yang tinggi sesuai rencana yang dapat menjamin penggunaannya dalam pembangunan di berbagai konstruksi proyek. Menindaklanjuti permasalahan tersebut, diperlukan penelitian terhadap rancangan campuran beton yang tidak hanya memiliki kuat tekan dan kecepatan gelombang ultrasonik (*UPV*) yang baik tetapi juga berkelanjutan dengan menggunakan material daur ulang yang ramah lingkungan demi mewujudkan tujuan ke- 11 dari *Sustainable Development Goals*.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang dapat diambil berdasarkan latar belakang di atas sebagai berikut.

1. Kuat tekan dari beton dengan limbah batu bata tahan api sebagai pengganti parsial agregat kasar?
2. Kecepatan gelombang ultrasonik (*UPV*) yang melalui beton dengan limbah batu bata tahan api sebagai pengganti parsial agregat kasar?

3. Hubungan antara kuat tekan dan kecepatan gelombang ultrasonik (*UPV*) yang melalui beton dengan limbah batu bata tahan api sebagai pengganti parsial agregat kasar?
4. Hubungan antara kuat tekan dan berat jenis beton dengan limbah batu bata tahan api sebagai pengganti parsial agregat kasar?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang diambil, maka tujuan dari penelitian ini ialah sebagai berikut.

1. Untuk menganalisis kuat tekan dari beton dengan limbah batu bata tahan api sebagai pengganti parsial agregat kasar
2. Untuk menganalisis kecepatan gelombang ultrasonik (*UPV*) yang melalui beton dengan limbah batu bata tahan api sebagai pengganti parsial agregat kasar
3. Untuk menganalisis hubungan antara kuat tekan dan kecepatan gelombang ultrasonik (*UPV*) yang melalui beton dengan limbah batu bata tahan api sebagai pengganti parsial agregat kasar
4. Untuk menganalisis hubungan antara kuat tekan dan berat jenis beton dengan limbah batu bata tahan api sebagai pengganti parsial agregat kasar

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah untuk mendapatkan rancangan campuran beton dengan batu bata tahan api sebagai pengganti parsial agregat kasar yang memiliki kuat tekan dan kecepatan gelombang ultrasonik yang baik.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Untuk berjalannya penelitian ini dengan baik dan sesuai dengan rencana, maka ruang lingkup dari penelitian ini ialah sebagai berikut.

1. *Refractory Brick* (Batu Bata Tahan Api) yang digunakan ialah batu bata tahan api tipe Alumina dan Magnesia
2. Semen yang digunakan adalah salah satu semen campuran (*blended cement*), yaitu *Portland Composite Cement (PCC)*.
3. Penelitian menggunakan cetakan benda uji berbentuk silinder dengan ukuran diameter 100 mm dan tinggi 200 mm

4. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 7 hari dan 28 hari dengan tipe perawatan *water curing* pada benda uji
5. Pengujian dilakukan di laboratorium dengan mengikuti prosedur yang sesuai dengan standar pengujian yang berlaku di Indonesia (SNI).

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penggunaan batu bata tahan api (*Refractory Brick*) dalam dunia konstruksi difokuskan dalam pembuatan beton sebagai bahan material pengganti agregat. Dalam pembuatan beton menggunakan batu bata tahan api ini dilakukan dengan mengganti agregat kasar ataupun agregat halus sebagian. Berikut ini beberapa penelitian terdahulu yang relevan terkait penggunaan batu bata tahan api dalam pembuatan beton sebagai pengganti agregat alami.

2.1.1 Penggunaan *Refractory Brick*

Hachemi, Samya et al. (2022) menunjukkan efek dari batu bata daur ulang dan faktor air semen pada sifat fisik dan mekanik dari beton yang terbuat dari agregat daur ulang dari batu bata tahan api (*refractory brick*). Untuk tujuan ini, tiga rangkaian campuran, dengan komposisi berbeda disiapkan. Pada seri pertama, beton acuan konvensional dibuat dengan 100% *Natural Aggregates (NA)*. Pada seri kedua, beton diproduksi dengan mengganti 20% NA kasar dengan *Refractory Brick Aggregates (RBA)* kasar. Pada seri ketiga, beton diproduksi dengan mengganti 20% NA kasar dan halus dengan RBA kasar dan halus. Dalam semua campuran, tiga rasio w/c ($w/c = 0,59, 0,47, \text{ dan } 0,38$) dievaluasi. Parameter yang diuji dalam percobaan ini adalah: penyerapan air, porositas air, berat jenis, *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*, kuat tekan, dan modulus elastisitas dinamis. Hasil percobaan menunjukkan bahwa kinerja beton yang dibuat dengan RBA sedikit lebih rendah dari beton konvensional. Di sisi lain, penurunan UPV dan modulus elastisitas dinamis beton yang dibuat dengan RBA kasar dan halus 20% sedikit lebih tinggi daripada beton yang dibuat dengan RBA kasar 20%. Hasil yang sama diamati untuk penyerapan air dan porositas air. Namun, mengganti 20% RBA kasar dan halus mengarah pada peningkatan kuat tekan dan kerapatan beton. Sementara itu, berdasarkan perbandingan dengan data yang ada, ditemukan bahwa rasio w/c yang lebih rendah menghasilkan porositas beton yang lebih rendah, dan penurunan porositas secara umum mengarah pada peningkatan kinerja beton.

Nematzadeh, Mahdi et al. (2018) menggunakan batu bata tahan api yang telah didaur ulang menjadi agregat dan dicampur dengan serat *Calcium Aluminate Cement (CAC)* dan *Polyvinyl Alcohol (PVA)* dalam beton di lingkungan asam untuk peninjauan perilaku optimasi kuat beton tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki perilaku tekan beton yang mengandung agregat bata refraktori daur ulang halus bersama dengan serat *Calcium Aluminate Cement (CAC)* dan *Polyvinyl Alcohol (PVA)* di bawah lingkungan asam. Untuk mencapai tujuan tersebut, 96 benda uji beton agregat halus dipaparkan dengan serangan asam sulfat 5% selama periode 0, 7, 21, dan 63 hari, kemudian dilakukan berbagai percobaan. Untuk mengetahui tingkat korosi benda uji terlebih dahulu dilakukan pengujian variasi berat, kemudian dilakukan pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*, yaitu pengujian beton non destruktif untuk mendapatkan tingkat porositas dan densitas, dan Pada akhir fase percobaan, spesimen dilakukan pengujian tekan setelah diperiksa secara visual untuk memeriksa tingkat korosi. Akhirnya, dengan menggunakan *Respon Surface Method (RSM)*, solusi optimal untuk parameter desain disajikan dengan memaksimalkan kuat tekan beton berserat serta membuat campuran beton hemat biaya. Secara umum, hasil menunjukkan bahwa spesimen yang mengandung semen kalsium aluminat bersama dengan serat PVA menunjukkan sifat mekanik yang baik dalam hal pengendalian korosi terhadap serangan asam, sementara spesimen yang mengandung agregat bata tahan api yang halus menunjukkan kinerja yang kurang memuaskan dalam hal ini.

Cachim, Paulo B. (2009) melakukan penelitian di University of Aveiro, Portugal untuk mengevaluasi sifat-sifat beton yang dibuat dengan batu bata yang dihancurkan menggantikan agregat alami. Dua jenis batu bata diselidiki. Batu bata dihancurkan untuk mendapatkan agregat yang dapat digunakan. Sifat-sifat yang diteliti adalah workability dan densitas beton segar, kuat tekan, kuat belah tarik, modulus elastisitas dan perilaku tegangan-regangan beton keras. Rasio penggantian agregat alami sebesar 15% dan 30% diselidiki serta rasio air/semén 0,45 dan 0,5. Indeks kekuatan digunakan untuk menilai efektivitas penggantian agregat. Hasil beton yang diproduksi dengan agregat daur ulang dibandingkan dengan beton acuan yang diproduksi dengan agregat batu kapur alami yang saat ini digunakan di Portugal. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa sisa keramik dapat digunakan sebagai pengganti sebagian agregat alam pada beton tanpa pengurangan sifat beton untuk penggantian 15% dan dengan pengurangan hingga 20% untuk penggantian

30%. Jenis dan proses pembuatan batu bata tampaknya mempengaruhi sifat-sifat beton yang dihasilkan. Karakteristik beton dengan batu bata menunjukkan kemungkinan penggunaan beton jenis ini dalam aplikasi pracetak.

2.1.2 Hubungan antara Kuat Tekan dan Kecepatan Gelombang Ultrasonik (*Ultrasonic Pulse Velocity*)

Mohammed, Azad A. (2020) melakukan penelitian terkait hubungan antara kuat tekan dan perilaku non-destruktif kecepatan pulsa ultrasonik (UPV) beton yang mengandung berbagai limbah plastik telah diselidiki. Untuk tujuan ini, sebanyak 102 observasi data dikumpulkan dari sembilan karya sebelumnya tentang sifat-sifat beton dengan limbah plastik dan dianalisis. Hubungan antara kuat tekan dan UPV dengan agregat sampah plastik ditemukan lemah. Juga, hubungan antara tekan dan UPV tidak kuat, dan sebaliknya, ada korelasi yang relatif kuat antara rasio kuat tekan (beton dengan limbah plastik/beton kontrol) dan rasio UPV. Dengan menggunakan analisis regresi, dikembangkan persamaan untuk menghitung kuat tekan beton dengan limbah plastik berdasarkan data uji UPV. Persamaan yang diusulkan sangat membantu untuk menilai kekuatan tekan sisa dan akibatnya pemantauan kesehatan struktur dari struktur yang terbuat dari beton dengan sebagian agregat diganti dengan limbah plastik, yang pada dasarnya bergantung pada data uji UPV dan kuat tekan beton kontrol.

Mahure, N. V. et al. (2011) menggunakan benda uji dalam penelitiannya yang terbuat dari beton dengan variasi kadar semen, rasio air-semen (w/c) dan kadar agregat kasar dengan metode *weight batching*. Pengukuran UPV dan uji kuat tekan dilakukan pada kubus beton pada umur 7 dan 28 hari. Hubungan yang dikembangkan dalam penelitian ini bersifat spesifik kasus karena UPV dan kuat tekan beton bergantung pada berbagai faktor seperti kandungan pasta semen-mortar, rasio air-semen dan kandungan agregat kasar serta kualitasnya, bahan tambahan. Beton yang mengeras (pada usia 28 hari) dipilih sebagai subjek untuk analisis dalam penelitian ini. Ditemukan bahwa dengan kelas beton yang sama, kurva hubungan yang jelas dapat ditarik untuk menggambarkan UPV dan kuat tekan beton keras. Makalah ini mengusulkan UPV dan kurva hubungan kekuatan untuk berbagai campuran beton/kelas yang digunakan dalam struktur beton Proyek Listrik Tenaga Air Tehri, Uttarakhand. Perkiraan kurva korelasi diverifikasi agar sesuai untuk prediksi kekuatan beton keras dengan nilai UPV terukur dalam pemantauan kesehatan struktur di bawah referensi selama periode layanannya.

2.2 Beton

Menurut SNI 2847:2019 beton adalah campuran semen Portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan campuran tambahan (*admixture*). Seiring dengan penambahan umur, beton akan semakin mengeras dan akan mencapai kekuatan rencana pada usia 28 hari. Beton memiliki daya kuat tekan yang baik oleh karena itu beton banyak dipakai atau dipergunakan untuk pemilihan jenis struktur terutama struktur bangunan, jembatan dan jalan.

Pada dasarnya, beton terdiri dari agregat, semen hidrolis, air, dan boleh mengandung bahan bersifat semen lainnya dan atau bahan tambahan kimia lainnya. Beton dapat mengandung sejumlah rongga udara yang terperangkap atau dapat juga rongga udara yang sengaja dimasukkan melalui penambahan bahan tambahan. Bahan tambahan kimia sering digunakan untuk mempercepat, memperlambat, memperbaiki sifat kemudahan pengerjaan (*workability*), mengurangi air pencampur, menambah kekuatan, atau mengubah sifat-sifat lain dari beton yang dihasilkan.

Kualitas beton yang dihasilkan dari campuran bahan-bahan dasar penyusun beton meliputi kekuatan dan keawetan. Sifat-sifat sangat ditentukan oleh sifat penyusunnya, cara pengadukan, cara pengerjaan selama penuangan adukan beton ke dalam cetakan beton, cara pemadatan dan cara perawatan selama proses pengerasan. Beton mempunyai karakteristik yang spesifikasinya terdiri dari beberapa bahan penyusun.

Menurut Tjokrodimuljo (2007) beton memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan sebagai berikut.

1. Kelebihan

- a. Harga yang relatif lebih murah karena menggunakan bahan-bahan dasar yang umumnya mudah didapat
- b. Termasuk bahan yang awet, tahan aus, tahan panas, tahan terhadap pengkaratan atau pembusukan oleh kondisi lingkungan, sehingga biaya perawatan menjadi lebih murah
- c. Mempunyai kuat tekan yang cukup tinggi sehingga jika dikombinasikan dengan baja tulangan yang mempunyai kuat tarik tinggi sehingga dapat menjadi satu kesatuan struktur yang tahan tarik dan tahan tekan, untuk itu struktur beton bertulang dapat

diaplikasikan atau dipakai untuk pondasi, kolom, balok, dinding, perkerasan jalan, landasan pesawat udara, penampung air, pelabuhan, bendungan, jembatan dan sebagainya

- d. Pengerjaan (*workability*) mudah karena beton mudah untuk dicetak dalam bentuk dan ukuran sesuai keinginan. Cetakan beton dapat dipakai beberapa kali sehingga secara ekonomi menjadi lebih murah.

2. Kekurangan

- a. Bahan dasar penyusun beton agregat halus maupun agregat kasar bermacam-macam sesuai dengan lokasi pengambilannya, sehingga cara perencanaan dan cara pembuatannya bermacam-macam
- b. Beton mempunyai beberapa kelas kekuatannya sehingga harus direncanakan sesuai dengan bagian bangunan yang akan dibuat, sehingga cara perencanaan dan cara pelaksanaan bermacam-macam pula
- c. Beton mempunyai kuat tarik yang rendah, sehingga getas atau rapuh dan mudah retak. Oleh karena itu perlu diberikan cara-cara untuk mengatasinya, misalnya dengan memberikan baja tulangan, serat baja dan sebagainya agar memiliki kuat tarik yang tinggi.

2.2.1 Penggunaan Beton

Dunia konstruksi di Indonesia saat ini semakin pesat perkembangannya dan signifikan. Hal ini dibuktikan dengan banyaknya proyek-proyek bangunan konstruksi yang sedang berjalan. Perkembangan yang dimaksudkan tentunya akan berdampak terhadap kebutuhan masyarakat akan penggunaan beton. Hal tersebut dikarenakan beton merupakan bahan konstruksi yang paling sering digunakan dan mudah dalam memproduksinya.

Beton adalah campuran agregat semen, kerikil dan pasir dengan perbandingan tertentu untuk menghasilkan kekuatan tertentu. Sesuai dengan sifat beton dalam konstruksi, tahan terhadap tekan, maka konstruksi beton lebih banyak dipakai sebagai distribusi beban tekan. Sampai sekarang dan masa datang, beton bertulang masih akan menjadi bahan bangunan terpenting.

Perpaduan dua bahan beton dan baja setelah selesai di cor menjadi bahan komposit kuat menahan gaya-gaya utama yaitu tekan dan tarik, membuat beton

bertulang menjadi bahan bangunan dengan penggunaan hamper tak terbatas. Kekuatan itu akan semakin besar, dimensi semakin kecil dengan perhitungan-perhitungan yang lebih maju, pula dengan kreatifitas arsitek dalam segi bentuk yang juga menentukan kekuatan. Semua itu di mulai dari Francis Vicat, dan Joseph monier dengan pot tanaman dari semen dengan rangka jaringan besi, Hennebique dan Coignet dengan lumbung gandumnya serta Anatole de Baudot yang merancang Saint Jean de Montmartre di Paris Prancis, yang untuk pertama kalinya bangunan di dunia yang menggunakan beton bertulang sebagai struktur dan ornament pembentuk estetikanya.

2.2.2 Jenis-Jenis Beton

Menurut Mulyono (2006) secara umum beton dibedakan menjadi dua kelompok, yaitu sebagai berikut.

1. Beton Berdasarkan Kelas dan Mutu Beton

Kelas dan mutu beton dibedakan menjadi 3 kelas sebagai berikut.

a. Beton Kelas I

Beton kelas I adalah beton untuk pekerjaan-pekerjaan non struktural. Untuk pelaksanaannya tidak diperlukan keahlian khusus. Pengawasan mutu hanya dibatasi pada pengawasan ringan terhadap mutu bahan-bahan, sedangkan terhadap kekuatan tekan tidak disyaratkan pemeriksaan. Mutu kelas I dinyatakan dengan B0.

b. Beton Kelas II

Beton kelas II adalah beton untuk pekerjaan-pekerjaan struktural secara umum. Pelaksanaannya memerlukan keahlian yang cukup dan harus dilakukan di bawah pimpinan tenaga-tenaga ahli. Beton kelas II dibagi dalam mutu-mutu standar B1, K 125, K 175, dan K 225. Pada mutu B1, pengawasan mutu hanya dibatasi pada pengawasan terhadap mutu bahan-bahan sedangkan terhadap kekuatan tekan tidak disyaratkan pemeriksaan. Pada mutu-mutu K 125 dan K 175 dengan keharusan untuk memeriksa kekuatan tekan beton secara kontinu dari hasil-hasil pemeriksaan benda uji.

c. Beton Kelas III

Beton kelas III adalah beton untuk pekerjaan-pekerjaan struktural yang lebih tinggi dari K 225. Pelaksanaannya memerlukan keahlian

husus dan harus dilakukan di bawah pimpinan tenaga-tenaga ahli. Disyaratkan adanya laboratorium beton dengan peralatan yang lengkap serta dilayani oleh tenaga-tenaga ahli yang dapat melakukan pengawasan mutu beton secara kontinu.

2. Beton Berdasarkan Jenisnya

a. Beton Ringan

Beton ringan merupakan beton yang dibuat dengan bobot yang lebih ringan dibandingkan dengan bobot beton normal. Agregat yang digunakan untuk memproduksi beton ringan pun merupakan agregat ringan juga. Agregat yang digunakan umumnya merupakan hasil dari pembakaran shale, lempung, slates, residu slag, residu batu bara dan banyak lagi hasil pembakaran vulkanik. Berat jenis agregat ringan sekitar 1900 kg/m^3 atau berdasarkan kepentingan penggunaan strukturnya berkisar antara 1440 kg/m^3 - 1850 kg/m^3 , dengan kekuatan tekan umur 28 hari lebih besar dari 17,2 MPa.

b. Beton Normal

Beton normal adalah beton yang menggunakan agregat pasir sebagai agregat halus dan batu pecah sebagai agregat kasar sehingga mempunyai berat jenis beton antara 2200 kg/m^3 - 2400 kg/m^3 dengan kuat tekan sekitar 15 - 40 MPa.

c. Beton Berat

Beton berat adalah beton yang dihasilkan dari agregat yang memiliki berat isi lebih besar dari beton normal atau lebih dari 2400 kg/m^3 . Untuk menghasilkan beton berat digunakan agregat yang mempunyai berat jenis yang besar.

d. Beton Massa (*Mass Concrete*)

Mass Concrete atau beton massa ialah beton yang dituang dalam volume besar yaitu perbandingan antara volume dan luas permukaannya besar. Biasanya dianggap beton massa jika dimensinya lebih dari 60 cm. Beton massa digunakan untuk pekerjaan beton yang besar dan masif, misalnya untuk proyek bendungan, kanal, fondasi, dan jembatan.

e. Beton Serat

Beton serat adalah beton komposit yang terdiri dari beton biasa dan bahan lain yang berupa serat. Bahan serat dapat berupa serat asbes, serat tumbuh-tumbuhan (rami, bambu, ijuk), serat plastik (*polypropylene*) atau potongan kawat logam.

f. Beton Non Pasir

Beton non pasir adalah suatu bentuk sederhana dan jenis beton ringan yang diperoleh menghilangkan bagian halus agregat pada pembuatannya. Rongga dalam beton mencapai 20-25 %.

g. Beton Siklop

Beton siklop sama dengan beton normal namun agregat yang digunakan memiliki ukuran yang besar. Ukurannya bisa mencapai 20 cm. Namun, proporsi agregat yang lebih besar tidak boleh lebih dari 20 %.

h. Beton Hampa (*Vacuum Concrete*)

Beton hampa adalah beton yang dibuat seperti beton biasa namun setelah tercetak padat kemudian air sisa reaksi disedot secara khusus. Dengan demikian air yang tinggal hanyalah air yang dipakai untuk bereaksi dengan semen sehingga beton yang diperoleh sangat kuat.

2.2.3 Sifat-Sifat Beton

Pada umumnya beton terdiri dari kurang lebih 15% semen, 8% air, 3% udara, dan selebihnya agregat kasar dan agregat halus. Campuran tersebut setelah mengeras mempunyai sifat yang berbeda-beda tergantung pada cara pembuatan, perbandingan campuran, cara mencampur, cara mengangkut, cara mencetak, cara memadatkan, cara merawat, dan sebagainya, akan mempengaruhi sifat-sifat beton. Sifat-sifat beton yang diuraikan tidak selalu sama semua harus dimiliki oleh setiap konstruksi beton, dan sifat-sifat tersebut juga relatif ditinjau dari sudut pemakaian beton itu sendiri. Yang penting beton harus memiliki sifat-sifat yang sesuai dengan tujuan pemakaian beton. Misalnya suatu kolom bangunan, yang terpenting harus memiliki kuat tekan yang tinggi yang cukup kuat untuk menahan beban bangunan itu, sedang sifat kerapatan air tidak penting untuk diperhatikan, sebaliknya suatu bak air harus memiliki sifat rapat air.

Sifat-sifat beton pada umumnya dipengaruhi oleh kualitas bahan, cara pengerjaan, dan cara perawatannya. Karakteristik semen mempengaruhi kualitas beton dan kecepatan pengerasannya. Gradasi agregat halus mempengaruhi pengerjaannya, sedang gradasi agregat kasar mempengaruhi kekuatan beton. Kualitas dan kuantitas air mempengaruhi pengerasan dan kekuatan (Mudrock dan Brook, 2003). Beberapa sifat-sifat dari beton sendiri ialah sebagai berikut.

1. Tahan Lama (*Durability*)

Durability ialah kemampuan beton bertahan seperti kondisi yang direncanakan tanpa terjadi tanpa terjadi korosi dalam jangka waktu yang direncanakan. Dalam hal ini perlu pembatasan nilai factor air semen maksimum maupun pembatasan dosis semen minimum yang digunakan sesuai dengan kondisi lingkungan. Sifat tahan lama dapat dibedakan dalam beberapa hal, sebagai berikut.

- a. Tahan terhadap pengaruh cuaca Pengaruh cuaca yang dimaksud adalah pengaruh yang berupa hujan dan pembekuan pada musim dingin, serta pengembangan dan penyusutan yang diakibatkan oleh basah dan kering silih berganti.
- b. Tahan terhadap zat kimia daya perusak kimiawi oleh bahan-bahan seperti air laut, rawa-rawa, dan limbah, zat kimia hasil industri, buangan air kotor dari kota, dan sebagainya perlu diperhatikan terhadap keawetan beton.
- c. Tahan terhadap erosi Beton dapat mengalami kikisan yang diakibatkan oleh adanya orang yang berjalan kaki dan gerakan lalu lintas di atasnya, gerakan ombak laut, atau oleh partikel yang terbawa oleh air laut atau angin laut.

2. Kuat Tekan

Kuat tekan ditentukan berdasarkan pembebanan *uniaxial* terhadap benda uji silinder beton dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm atau diameter 10 mm dengan tinggi 20 mm dalam satuan N/mm^2 yang diatur dalam SNI 1974 2011.

3. Kuat Tarik

Kuat tarik beton ialah salah satu sifat yang penting untuk memprediksi retak dan defleksi dari beton. Dimana kuat tarik beton jauh lebih kecil dari kuat tekannya, yaitu berkisar antara 10 % – 15 %.

4. Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas beton adalah perbandingan antara kuat tekan beton dengan regangan beton yang biasanya ditentukan pada 25 % - 50 % dari kuat tekan beton.

5. Rangkak (*Creep*)

Rangkak beton adalah salah satu sifat dimana beton akan mengalami deformasi secara menerus menurut waktu di bawah beban yang dipikul.

6. Susut (*Shrinkage*)

Susut beton adalah perubahan volume yang dari beton yang tidak dipengaruhi oleh pembebanan.

7. *Workability*

Workability adalah tingkat kemudahan pengerjaan beton dalam mencampur, mengaduk, menuang dalam cetakan dan pemadatan tanpa homogenitas beton berkurang dan beton tidak mengalami bleeding (pemisahan) yang berlebihan untuk mencapai kekuatan beton yang diinginkan. *Workability* dari beton dapat diketahui dari pengujian *Slump* beton yang sesuai standar SNI 1972:2008 tentang Cara Uji Slump Beton. Beberapa hal yang mempengaruhi *workability* beton sebagai berikut.

- a. Jumlah semen pasta (adukan semen). Semen pasta adalah campuran semen dan air. Semakin banyak pasta semen yang dicampur dengan agregat kasar dan halus, maka semakin besar *workability*-nya.
- b. Tingkat gradasi agregat. Agregat yang termasuk *well-graded* (tergradasi dengan baik), permukaan halus, dan bentuk cenderung bulat akan meningkatkan *workability* dari campuran beton.
- c. Untuk meningkatkan *workability*, dapat dilakukan dengan menambah pasta semen, menggunakan *well-graded* agregat, ataupun menggunakan *admixture*.

2.3 Material Penyusun Beton

2.3.1 *Portland Cement Composite*

Semen adalah bahan yang mempunyai sifat adhesive maupun kohesif, yaitu bahan pengikat. Ada dua macam semen, yaitu semen hidraulis dan semen non-hidraulis. Semen non-hidraulis adalah semen (perekat) yang dapat mengeras tetapi tidak stabil dalam air. Semen hidraulis adalah semen yang akan mengeras bisa

bereaksi dengan air, tahan terhadap air (water resistance) dan stabil di dalam air setelah mengeras.

Salah satu semen hidraulis yang biasa dipakai dalam konstruksi beton adalah semen Portland. Menurut Standar Industri Indonesia (SII 0031-1981) semen Portland adalah semen hidraulis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker yang terutama terdiri dari silikat-silikat kalsium yang bersifat hidraulis bersama bahan-bahan yang biasa digunakan, yaitu gypsum. Semen yang beredar dipasaran dalam kemasan zak 40 kg dan 50 kg saat ini adalah semen tipe *PPC (Portland Pozolan Cement)* dan *PCC (Portland Composite Cement)*.

Menurut SNI 15 2049 2004, semen Portland adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland terutama yang terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain. Beberapa jenis semen berdasarkan penggunaannya ialah sebagai berikut.

1. Jenis I, yaitu semen portland untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti yang disyaratkan pada jenis-jenis lain.
2. Jenis II, yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau kalor hidrasi sedang.
3. Jenis III, yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi.
4. Jenis IV, yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kalor hidrasi rendah
5. Jenis V, yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat.

Persyaratan kimia semen Portland harus memenuhi persyaratan sesuai Tabel 1 berikut.

Tabel 1 Syarat Kimia Utama Semen Portland

No.	Uraian	Jenis Semen Portland				
		I	II	III	IV	V
1	SiO ₂ , minimum	-	20,0	-	-	-
2	Al ₂ O ₃ , maksimum	-	6,0	-	-	-
3	Fe ₂ O ₃ , maksimum	-	6,0	-	6,5	-
4	MgO, maksimum	6,0	6,0	-	6,0	6,0

No.	Uraian	Jenis Semen Portland				
		I	II	III	IV	V
5	SO ₃ , maksimum					
	Jika C ₃ A ≤ 8,0	3,0	3,0	3,5	2,3	2,3
	Jika C ₃ A > 8,0	3,5		4,5		
6	Hilang pijar, maksimum	5,0	3,0	3,0	2,5	3,0
7	Bagian tak larut, maksimum	3,0	1,5	1,5	1,5	1,5
8	C ₃ S, maksimum	-	-	-	35	-
9	C ₃ S, minimum	-	-	-	40	-
10	C ₃ A, maksimum	-	8,0	15	7	5
11	C ₄ AF + 2C ₃ A atau	-	-	0	-	25
	C ₄ AF + C ₂ F, maksimum					

Sumber: SNI 15 2049 2004

Selain itu, terdapat persyaratan fisika semen Portland yang tercantum dalam Tabel 2 berikut.

Tabel 2 Syarat Fisika Utama Semen Portland

No.	Uraian	Jenis Semen Portland				
		I	II	III	IV	V
	Kehalusan:					
	Uji permeabilitas udara, m ² /kg					
1	Dengan alat:					
	Turbidimeter, min	160	160	160	160	160
	Blaine, min	280	280	280	280	280
	Kekekalan:					
2	Pemuaian dengan autoclave, maks %	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
	Kuat tekan:					
3	Umur 1 hari, kg/cm ² , minimum	-	-	120	-	-
	Umur 3 hari, kg/cm ² , minimum	125	-	240	-	80
	Umur 7 hari, kg/cm ² , minimum	200	100	-	70	150
	Umur 28 hari, kg/cm ² , minimum	280	175	-	170	210
	Waktu pengikatan (metode alternatif)					
	dengan alat:					
	Gillmore					
4	- Awal, menit, minimal	60	60	60	60	60
	- Akhir, menit, maksimum	600	600	600	600	600
	Vicat					
	- Awal, menit, minimal	45	45	45	45	45
	- Akhir, menit, maksimum	375	375	375	375	375

2.3.2 Agregat Halus (Pasir)

Agregat adalah butiran mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran mortar atau beton. Agregat menempati 70 – 75 % volume total dari beton, maka kualitas agregat sangat berpengaruh terhadap kualitas beton. Dengan agregat yang baik, beton dapat dikerjakan, kuat, tahan lama dan ekonomis. Atas dasar inilah gradasi dari ukuran-ukuran partikel dalam agregat, mempunyai peranan yang sangat penting, untuk menghasilkan susunan beton yang padat. Gradasi agregat ialah distribusi ukuran butiran dari agregat. Bila butiran-butiran agregat mempunyai ukuran sama (seragam) volume pori akan besar. Sebaliknya bila ukuran butir-butirnya bervariasi maka volume pori menjadi kecil. Hal ini karena butiran yang kecil mengisi pori diantara butiran yang besar, sehingga pori-pori menjadi sedikit, dengan kata lain kemampatan menjadi tinggi (Tjokrodimulyo, 2007). Agregat pada umumnya digolongkan menjadi 3 kelompok, yaitu:

1. Batu, umumnya besar butiran lebih dari 40 mm,
2. Kerikil, untuk butiran antara 5 sampai 40 mm,
3. Pasir, untuk butiran antara 0,15 sampai 5 mm.

Agregat halus adalah pasir alam sebagai hasil disintegrasi alami batuan atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir terbesar 4,75 mm (SNI 1970:2016).

Agregat halus ini dapat diperoleh dari dalam tanah ataupun dasar sungai dan tepi laut. Oleh karena itu, pasir digolongkan menjadi 3 macam, yaitu: pasir galian; pasir sungai; dan pasir laut. Sedangkan, ukuran agregat halus (pasir) dibagi menjadi 4 zona yang diketahui dari uji gradasi ditunjukkan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3 Batas Gradasi Agregat Halus

Lubang Ayakan (mm)	Presentase Lolos			
	Daerah I	Daerah II	Daerah III	Daerah IV
10	100	100	100	100
4,8	90 - 100	90 - 100	90 - 100	95 - 100
2,4	60 - 95	75 - 100	85 - 100	95 - 100
1,2	30 - 70	55 - 90	75 - 100	90 - 100
0,6	15 - 34	35 - 59	60 - 79	80 - 100
0,3	5 - 20	8 - 30	12 - 40	15 - 50
0,15	0 - 10	0 - 10	0 - 10	0 - 15

Sumber: SNI 03 2834 2000

Keterangan:

- Daerah agregat halus I : Pasir Kasar
 Daerah agregat halus II : Pasir Agak Kasar
 Daerah agregat halus III : Pasir Agak Halus
 Daerah agregat halus IV : Pasir Halus

2.3.3 Agregat Kasar (Batu Pecah)

Agregat kasar adalah kerikil sebagai hasil disintegrasi alami dari batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 4,75 mm sampai 40 mm (SNI 1969:2016).

Untuk menghasilkan beton dengan kekompakan yang baik, diperlukan gradasi agregat yang baik, dimana ukuran maksimal agregat kasar dikelompokkan menjadi 3 golongan yang dapat diketahui melalui uji gradasi yang akan ditunjukkan pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4 Batas Gradasi Agregat Kasar

Ukuran Saringan (mm)	Presentasi Lolos (%) Gradasi Agregat		
	40 mm	20 mm	10 mm
76	100	-	-
38	95 - 100	100	-
19	35 - 70	95 - 100	100
9,6	10 - 40	30 - 60	50 - 85
4,8	0 - 5	0 - 10	0 - 10

Sumber: SNI 03 2834 2000

2.3.4 Air

Fungsi air pada campuran beton adalah untuk membantu reaksi kimia yang menyebabkan berlangsungnya proses pengikatan serta sebagai pelicin antara campuran agregat dan semen agar mudah dikerjakan. Pemakaian air untuk beton sebaiknya memenuhi persyaratan.

Air berpengaruh terhadap kuat tekan beton, karena kelebihan air akan menyebabkan penurunan pada kekuatan beton itu sendiri. Selain itu kelebihan air akan mengakibatkan beton mengalami bleeding, yaitu air bersama-sama semen akan bergerak ke atas permukaan adukan beton segar yang baru saja dituang. Hal ini akan menyebabkan kurangnya lekatan beton antara lapis permukaan (akibat bleeding) dengan beton lapisan di bawahnya. Air untuk pembuatan beton minimal memenuhi syarat sebagai air minum yaitu tawar, tidak berbau, bila dihembuskan

dengan udara tidak keruh dan lain-lain, tetapi tidak berarti air yang digunakan untuk pembuatan beton harus memenuhi syarat sebagai air minum.

Dalam pemakaian air untuk beton sebaiknya air memenuhi syarat sebagai berikut (Tjokrodinuljo, 2007):

- a. Tidak mengandung lumpur (benda melayang lainnya) lebih dari 2 gram/liter.
- b. Tidak mengandung garam-garam yang dapat merusak beton (asam, zat organik, dan sebagainya) lebih dari 15 gram/liter.
- c. Tidak mengandung klorida (Cl) lebih dari 0,5 gram/liter.
- d. Tidak mengandung senyawa sulfat lebih dari 1 gram/liter

2.3.5 Refractory Brick

Refractory Brick (Batu Bata Tahan Api) adalah material inorganik natural maupun sintesis, tahan terhadap temperatur yang lebih besar dari 1500°C tanpa terjadinya perubahan bentuk ataupun peleburan akibat tingginya suhu yang dikenainya. Syarat dari batu bata tahan api ini ialah mampu mempertahankan bentuk dan kekuatan pada temperatur yang tinggi serta dalam berbagai kondisi. Tujuan dari penggunaan batu bata tahan api ini ialah untuk menahan laju perpindahan panas di dalam tungku pembakaran dapur (*furnace*) ke luar.

Beberapa sifat dari *Refractory Brick* yang diperlukan ialah sebagai berikut.

1. Tahan terhadap suhu tinggi
2. Tahan terhadap perubahan suhu yang mendadak
3. Tahan terhadap lelehan terak logam, kaca, dan gas panas
4. Tahan terhadap beban dan gaya abrasi
5. Menghemat panas
6. Memiliki koefisien ekspansi panas yang rendah
7. Tidak boleh mencemari bahan yang bersinggungan

Beberapa sifat fisik dari batu bata tahan api ini ialah sebagai berikut.

1. Titik leleh
2. Porositas
3. Kekuatan terhadap panas dan dingin
4. Ekspansi Thermal
5. Konduktivitas panas
6. Susut

Menurut ketahanannya terhadap temperatur pembagian dari *Refractory Brick*, yaitu sebagai berikut.

1. *Refractory* biasa (1580°C – 1770°C)
2. *Refractory* tinggi (1780°C – 2000°C)
3. *Refractory* super (>2000°C)

Beberapa jenis *Refractory* sebagai berikut.

Tabel 5 Jenis *Refractory Brick*

Acid	Basic	Neutral	Special
Fire brick	Magnesite	Chromite	Pure alumina
Semi silika	Dolomite	Carbon	Zirconthoria
Silika	Chrome Magnesite	Grafit	Spinel
	Forsterite	Silicon Carbide	Boran nitride

Sumber: Suharno, 2008

2.4 Pengujian Kuat Tekan

Menurut SNI 03-1974-1990, kuat tekan beton yaitu besarnya beban per satuan luas yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani gaya tekan tertentu, yang dihasilkan oleh mesin tekan.

Selanjutnya Mulyono (2006) mengemukakan bahwa kuat tekan beton mengidentifikasi mutu sebuah struktur di mana semakin tinggi tingkat kekuatan struktur yang dikehendaki, maka semakin tinggi pula mutu beton yang dihasilkan. Nilai kuat benda uji dapat dihitung dengan membagi beban maksimum yang diterima oleh benda uji selama pengujian dengan luas penampang melintang rata dan dinyatakan dengan dibulatkan ke 1 (satu) desimal dengan satuan 0,1 MPa (SNI 1974 2011), yang dinyatakan dalam persamaan (1)

$$\text{Kuat Tekan Beton} = \frac{P}{A} \quad (1)$$

dengan pengertian:

Kuat tekan beton dengan benda uji silinder, dinyatakan dalam MPa atau N/mm²

P adalah gaya tekan aksial, dinyatakan dalam Newton (N)

A adalah luas penampang melintang benda uji, dinyatakan dalam mm²

Beberapa faktor yang mempengaruhi kekuatan tekan beton. Ada empat bagian utama yang mempengaruhi mutu dari kekuatan beton, antara lain sebagai berikut:

1. Proporsi bahan-bahan penyusunnya.
2. Metode perancangan.
3. Perawatan.
4. Keadaan pada saat pengecoran dilaksanakan, yang terutama dipengaruhi oleh lingkungan setempat.

2.4.1 Peralatan Pengujian

Menurut SNI 1974 2011, mesin penguji yang digunakan harus berupa tipe yang memiliki kapasitas yang cukup dan mampu memberikan kecepatan beban secara konstan sebesar 1,3 mm/menit. Beberapa ketentuan peralatan mesin pengujian harus meliputi hal-hal sebagai berikut.

1. Mesin harus dioperasikan dengan tenaga listrik serta harus menggunakan pembebanan yang terus menerus dan tanpa kejutan. Jika mesin hanya memiliki satu kecepatan pembebanan sesuai persyaratan pada 6.4, mesin harus dilengkapi dengan alat tambahan untuk pembebanan pada kecepatan beban yang sesuai untuk keperluan verifikasi. Alat tambahan untuk pembebanan ini dapat dioperasikan dengan tenaga listrik maupun secara manual;
2. Kehancuran silinder beton dengan kuat tekan tinggi, pada umumnya memiliki daya sebar pecahan yang lebih tinggi dibandingkan dengan silinder beton dengan kuat tekan normal. Untuk keselamatan disarankan melengkapi alat uji dengan peralatan pelindung (semacam terali penutup di sekeliling benda uji);
3. Ruang yang disediakan untuk benda uji harus cukup luas memberikan tempat bagi alat kalibrasi, semacam alat kalibrasi elastis dengan kapasitas yang mencakup batasan beban yang mungkin terjadi pada mesin tekan serta sesuai dengan persyaratan. Alat kalibrasi harus ditempatkan pada posisi yang dapat dibaca. Tipe alat kalibrasi elastis yang umum tersedia dan yang umum digunakan adalah proving ring atau sel pembebanan (load cell).

2.4.2 Benda Uji

Benda uji yang digunakan dalam pengujian kuat tekan beton ini ialah benda uji berbentuk silinder yang dimana terdapat beberapa ketentuan dalam pemilihan benda uji, sebagai berikut.

1. Benda uji tidak diperkenankan untuk diuji jika salah satu diameternya berbeda lebih dari 2% dengan diameter bagian lainnya dari benda uji yang sama. Hal ini dapat terjadi bila cetakan sekali pakai rusak atau berubah bentuk pada saat pemindahan, pada saat cetakan sekali pakai yang bersifat fleksibel berubah bentuk ketika pencetakan atau bila pengeboran inti bergeser waktu pengeboran.
2. Tidak satupun dari benda uji tekan diperkenankan berbeda dari posisi tegak lurus
3. Terhadap sumbu lebih dari 0,5' (kira-kira sama dengan 3 mm untuk setiap 300 mm). Ujung benda uji tekan yang tidak rata sebesar 0,050 mm harus dilapisi kaping, dipotong atau digosok sesuai dengan SNI 03-6369-2000, atau jika ujung-ujungnya memenuhi persyaratan, lapis neoprene dengan pengontrol baja dapat digunakan sebagai pelapis. Diameter yang digunakan untuk perhitungan luas penampang melintang dari benda uji harus ditetapkan mendekati 0,25 mm dari rata-rata 2 (dua) diameter yang diukur tegak lurus di tengah-tengah benda uji.
4. Jumlah silinder yang diukur untuk menetapkan diameter rata-rata dapat dikurangi
5. Menjadi 1 (satu) untuk 10 (sepuluh) benda uji atau 3 (tiga) benda uji per hari, pilih mana yang lebih besar, bila benda uji diketahui dibuat dari satu kelompok cetakan yang dapat digunakan kembali atau cetakan sekali pakai yang secara konsisten menghasilkan benda uji dengan diameter rata-rata dalam rentang 0,5 mm. Bila diameter rata-rata tidak di dalam rentang 0,5 mm atau bila silinder tidak dibuat dari satu kelompok cetakan, masing-masing silinder yang diuji harus diukur dan nilai ini harus digunakan dalam perhitungan kuat tekan satuan benda uji itu. Bila diameter diukur pada frekuensi yang dikurangi, luas penampang melintang yang diuji pada hari tersebut harus dihitung dari rata-rata diameter 3 (tiga) silinder atau lebih yang dianggap mewakili grup yang diuji hari tersebut.
6. Panjang harus diukur sampai mendekati 0,05 D (diameter penampang benda uji) bila perbandingan panjang terhadap diameter kurang dari 1,8 atau lebih dari 2,2, atau bila isi silinder ditetapkan dari dimensi yang diukur.

7. Panjang dan diameter benda uji silinder memiliki perbandingan tertentu dimana benda uji standar memiliki rasio $L/D \approx 1,8$ sampai dengan 2,2 dengan faktor koreksi = 1.

2.4.3 Kecepatan Pembebanan

Dalam SNI 1974 2011, pengujian kuat tekan beton yang dilakukan menggunakan mesin uji kuat tekan dengan melakukan pembebanan hingga benda uji hancur. Pembebanan dilakukan secara terus-menerus dan tanpa kejutan dengan memenuhi ketentuan sebagai berikut.

1. Untuk mesin penguji tipe ulir, kepala mesin tekan yang bergerak harus bergerak pada kecepatan mendekati 1,3 mm/menit, pada saat mesin bergerak tanpa beban. Untuk mesin yang digerakan secara hidrolis, beban harus diberikan pada kecepatan gerak yang sesuai dengan kecepatan pembebanan pada benda uji dalam rentang 0,15 MPa/detik sampai dengan 0,35 MPa/detik. Kecepatan gerak yang ditentukan harus dijaga minimal selama setengah pembebanan terakhir dari fase pembebanan yang diharapkan dari siklus pengujian;
2. Selama periode $\frac{1}{2}$ (setengah) pertama dari 1 (satu) fase pembebanan yang diharapkan, pembebanan yang lebih cepat diperbolehkan;
3. Jangan membuat perubahan pada kecepatan gerak dari dasar mendatar kapanpun saat benda uji kehilangan kekakuan secara cepat sesaat sebelum hancur.

2.5 Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*

Dalam SNI ASTM C597:2012 tentang Metode Uji Kecepatan Rambat Gelombang melalui Beton dimana pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* dilakukan dengan merambatkan gelombang longitudinal yang dipancarkan oleh transduser elektro akustik yang berhubungan dengan salah satu permukaan beton yang diuji. Setelah melalui beton, rambat gelombang diterima dan dikonversikan menjadi energi listrik oleh transduser kedua yang berjarak L dari transduser pemancar. Waktu tempuh T diukur secara elektronik. Kecepatan rambat gelombang V dihitung dengan membagi L dengan T . Kecepatan rambat gelombang, V , dari gelombang longitudinal dalam suatu massa beton berhubungan dengan sifat elastisitas dan kerapatan, sesuai dengan persamaan (2).

$$v = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (2)$$

Keterangan:

E adalah modulus elastisitas dinamis

μ adalah rasio poisson dinamis

ρ adalah kerapatan beton

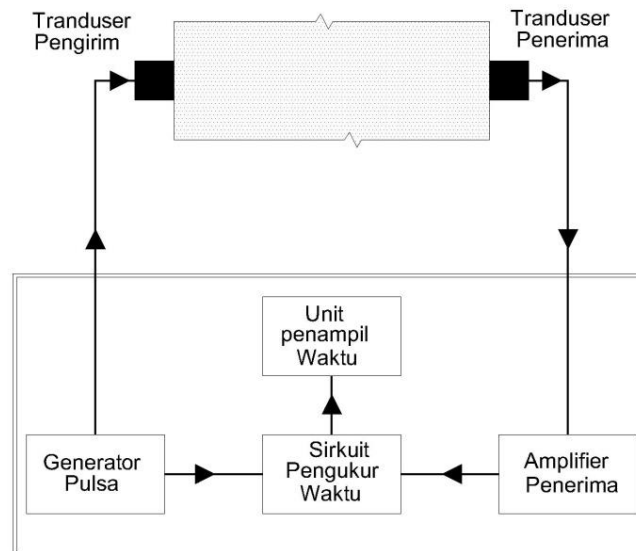
Pengujian kecepatan rambat gelombang melalui beton ini digunakan untuk menilai atau mengetahui keseragaman dan mutu relatif beton, mendeteksi adanya rongga dan retak, dan untuk mengevaluasi efektivitas perbaikan retak. Pengujian ini juga dapat digunakan untuk mengetahui adanya perubahan sifat-sifat beton dan pada pemeriksaan suatu struktur untuk memperkirakan tingkat kerusakan atau retakan pada beton. Apabila digunakan untuk mengamati perubahan-perubahan kondisi pada periode tertentu, lokasi uji harus diberi tanda pada struktur untuk memastikan pengujian dapat diulang pada posisi yang sama.

Tingkat kejenuhan beton mempengaruhi kecepatan rambat gelombang, dan faktor ini harus dipertimbangkan jika mengevaluasi hasil uji. Sebagai tambahan, kecepatan rambat gelombang pada beton yang jenuh air kurang sensitif terhadap perubahan-perubahan mutu beton relatif. Kecepatan rambat gelombang pada beton yang jenuh air dapat mencapai 5 % lebih tinggi daripada beton yang kering. Kecepatan rambat gelombang tidak tergantung pada ukuran obyek pengujian, pantulan gelombang dari sisi benda uji tidak berpengaruh pada waktu tiba dari kecepatan rambat gelombang yang dipancarkan langsung. Dimensi terkecil dari objek pengujian harus lebih besar dari panjang gelombang getaran ultrasonik.

Ketelitian pengukuran bergantung dari kemampuan operator dalam menentukan jarak yang tepat antara transduser pengirim dan transduser penerima dan kemampuan peralatan untuk mengukur dengan tepat waktu tempuh kecepatan rambat gelombang. Kuat sinyal yang diterima dan waktu tempuh yang terukur dipengaruhi oleh penempatan pasangan transduser pada permukaan beton. Bahan perantara (coupling agent) dan tekanan yang cukup harus diaplikasikan pada transduser untuk menjamin waktu tempuh yang stabil. Kuat sinyal yang diterima juga dipengaruhi oleh jarak tempuh serta tingkat keretakan atau penurunan mutu beton yang diuji.

Peralatan untuk pengujian, ditunjukkan secara skematik pada Gambar 1, terdiri dari generator kecepatan rambat gelombang, sepasang alat transduser

(pengirim dan penerima), amplifier, sirkuit pengukur waktu, unit untuk menampilkan waktu, dan kabel penghubung.



Gambar 1 Skematik Pengujian UPV

Dalam perhitungan nilai kecepatan rambat gelombang dapat dihitung menggunakan persamaan (3) sebagai berikut.

$$V = \frac{L}{T} \quad (3)$$

Keterangan:

V adalah kecepatan rambat gelombang, meter per sekon (m/s)

L adalah jarak antara pusat permukaan tranduser, meter (m)

T adalah waktu tempuh, sekon (s)