

TESIS

PENGARUH PENGGUNAAN LIMBAH BATU BATA TAHAN API TIPE MAGNESIA SEBAGAI AGREGAT KASAR PADA KUAT TARIK BETON

*The Effect of the Use of Waste Refractory Bricks Magnesia Type as
A Coarse Aggregate on The Tensile Strength of Concrete*

MUHAMMAD HUZAIR T

D012221034



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

PENGAJUAN TESIS

PENGARUH PENGGUNAAN LIMBAH BATU BATA TAHAN API TIPE MAGNESIA SEBAGAI AGREGAT KASAR PADA KUAT TARIK BETON

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister
Program Studi Ilmu Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

**MUHAMMAD HUZAIR T
D012221034**

Kepada

**PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

TESIS

PENGARUH PENGGUNAAN LIMBAH BATU BATA TAHAN API TIPE MAGNESIA SEBAGAI AGREGAT KASAR PADA KUAT TARIK BETON

MUHAMMAD HUZAIR T
D012221034

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 29 Mei 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



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

Pembimbing Pendamping



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

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr.Eng.Ir. Muhammad Isran Ramli, ST. MT.IPM
NIP. 197309262000121002

Ketua Program Studi
S2 Teknik Sipil



Dr.Ir.M.Asad Abdurrahman, ST. M.Eng.PM,IPM
NIP. 197303061998021001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Muhammad Huzair T
Nomor mahasiswa : D012221034
Program studi : Magister Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Pengaruh Penggunaan Limbah Batu Bata Tahan Api Tipe Magnesita Sebagai Agregat Kasar Pada Kuat Tarik Beton” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing Dr. Eng. M. Akbar Caronge, ST., M.Eng dan Prof. Dr. Ir. H. Muh. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah diproses di *Journal of Building Pathology and Rehabilitation* dengan status *under review (revise)* sebagai artikel dengan judul (“*Outlining the Tensile Load-Time History Behavior and Carbon Dioxide Emission of Concrete Made with Demolished Chromium-Ferrite-Magnesita Refractory Bricks*”)

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 3 Juni 2024

Yang menyatakan,



Muhammad Huzair T

KATA PENGANTAR

Dengan nama Allah Yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang. Puji syukur kami panjatkan kehadiran Allah Yang Maha Esa, karena atas berkat limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga kami dapat menyelesaikan penyusunan tesis ini dengan baik dan tepat pada waktunya. Dalam tesis ini, kami akan membahas mengenai **“PENGARUH PENGGUNAAN LIMBAH BATU BATA TAHAN API TIPE MAGNESIA SEBAGAI AGREGAT KASAR PADA KUAT TARIK BETON”** yang merupakan salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi Magister pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Kami menyampaikan penghargaan sangat tinggi dan mendalam kepada berbagai pihak yang telah membantu melewati semua proses penyusunan Tesis ini, terima kasih kepada:

1. **Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc.** selaku Rektor Universitas Hasanuddin.
2. **Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT, IPM, ASEAN. Eng.** selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. **Prof. Dr. Ir. H. Muh. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng** selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan selaku pembimbing II yang selalu memberikan arahan dan petunjuk dalam penyusunan Tesis ini.
4. **Dr. Eng. M. Akbar Caronge, ST., M.Eng** selaku pembimbing I yang telah meluangkan waktu dan pengarahan dalam proses penyusunan Tesis ini.
5. **Prof. Dr. Ing. Herman Parung, M.Eng, Prof. Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT, Dr. Eng. Ir. Bambang Bakri, ST., MT., IPU** selaku penguji.
6. **Prof. Dr. Eng. Ir. Rudy Djamaluddin, ST, M.Eng.** selaku Kepala Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
7. Seluruh dosen, staff dan karyawan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
8. **Teman-teman laboratorium riset *eco-material* (Deti, Ummul, Pororo, Viranti, Niar, Komang, Risal, Kak Erwin, Haerul, dan adik-adik 2019)** serta laboran laboratorium struktur & bahan yang turut membantu dalam proses penelitian.
9. Teman – teman **angkatan 20221** terkhusus magister KKD struktur yang telah memberikan dukungan dan dorongan selama masa studi.
10. Dan semua pihak yang terkait dalam proses studi ini.

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Orangtuaku yang tercinta dan sangat kusayangi, dengan penghargaan tertinggi saya sebutkan dengan hormat nama kedua orang tua saya, yaitu **Tamar Jaya** dan **Hj. Khadijah**. Terima kasih banyak atas doa, kasih sayang, nasehat, dan segala dukungan yang telah diberikan sampai saat ini dan nanti.
2. Saudara-saudaraku yang terkasih **Husniawati**, **Heruddin (ipar)**, **Hasrul** dan **Nofita Sari (ipar)**. Terima kasih untuk dukungan, semangat, dan doa yang turut membantu dalam penyelesaian tesis ini.

Kami menyadari bahwa masih banyak kekurangan pada tesis ini. Oleh karena itu saran serta kritik yang membangun dari pembaca sangat kami harapkan guna penyempurnaan penulisan Tesis.

Demikian Tesis ini kami buat, semoga dapat memberikan manfaat bagi kita semua.

Gowa, 3 Juni 2024
Penulis,

Muhammad Huzair T

ABSTRAK

Muhammad Huzair T. Pengaruh Penggunaan Limbah Batu Bata Tahan Api Tipe Magnesia sebagai Agregat Kasar pada Kuat Tarik Beton (dibimbing oleh **Muhammad Akbar Caronge** dan **Muhammad Wihardi Tjaronge**)

Daur ulang limbah industri konstruksi perlu dilakukan untuk mengurangi optimasi lahan akibat limbah industri konstruksi tersebut serta penggunaan material alam secara terus-menerus yang akan menyebabkan kelangkaan. Limbah batu bata tahan api (RB) merupakan limbah yang berpotensi untuk digunakan. Oleh karena itu, penelitian eksperimental perlu dilakukan untuk mengetahui pengaruh penggunaan limbah RB sebagai agregat kasar dengan persentase penggunaan sebesar 0% (sebagai pembanding), 15%, 30%, dan 50% dalam campuran beton. Dua target mutu direncanakan yakni $f'c = 21$ MPa dan $f'c = 25$ MPa untuk memproduksi beton. Selanjutnya dilakukan pengujian beton untuk mengetahui nilai kuat tarik belah beton, kurva hubungan kuat tarik beton dan regangan, kurva hubungan beban dan waktu, modulus elastisitas tarik, dan toughness index. Hasil pengujian menunjukkan nilai kuat tarik belah, modulus elastisitas tarik dan toughness index menurun seiring dengan peningkatan persentase penggunaan RB. Untuk kurva hubungan kuat tarik belah dan beton serta hubungan beban dan waktu menunjukkan tiga fase yaitu fase elastis, fase puncak dan fase ultimate. Sedangkan untuk regangan elastis, regangan puncak, dan regangan ultimate mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan persentase penggunaan RB. Berdasarkan analisis seluruh hasil pengujian, variasi 15% menunjukkan perolehan yang lebih baik dibandingkan variasi 30% dan 50% dari kedua mutu beton. Dapat disimpulkan bahwa penggunaan 15% RB sebagai pengganti agregat kasar merupakan alternatif potensial yang layak untuk memproduksi beton berkelanjutan.

Kata kunci: Batu bata tahan api (RB), Kuat tarik belah, Modulus Elastisitas, Beton berkelanjutan

ABSTRACT

Muhammad Huzair T. The Effect of the Use of Waste Refractory Bricks Magnesia Type as A Coarse Aggregate on The Tensile Strength of Concrete (supervised by **Muhammad Akbar Caronge** and **Muhammad Wihardi Tjaronge**)

Recycling of construction industry waste needs to be done to reduce land optimization due to construction industry waste as well as the continuous use of natural materials which will cause scarcity. Refractory brick (RB) waste is waste that has the potential to be used. Therefore, experimental research needs to be carried out to determine the effect of using RB waste as coarse aggregate with a usage percentage of 0% (as a comparison), 15%, 30% and 50% in the concrete mixture. Two quality targets are planned, namely $f'_c = 21$ MPa and $f'_c = 25$ MPa for producing concrete. Next, concrete testing is carried out to determine the value of concrete splitting tensile strength, the relationship curve between concrete tensile strength and strain, the relationship curve between load and time, tensile modulus of elasticity, and toughness index. The test results show that the value of split tensile strength, tensile modulus of elasticity and toughness index decreases along with the increase in the percentage of RB use. The curve for the relationship between split tensile strength and concrete as well as the relationship between load and time shows three phases, namely the elastic phase, peak phase and ultimate phase. Meanwhile, elastic strain, peak strain and ultimate strain increased along with the increase in the percentage of RB use. Based on the analysis of all test results, a 15% variation shows better results than a 30% and 50% variation for both concrete qualities. It can be concluded that the use of 15% RB as a substitute for coarse aggregate is a potentially viable alternative for producing sustainable concrete.

Keywords: Refractory bricks (RB), Indirect tensile strength, Modulus of Elasticity, Sustainable concrete

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PENGAJUAN TESIS.....	ii
PERSETUJUAN TESIS.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	2
1.4. Manfaat Penelitian.....	3
1.5. Ruang Lingkup.....	3
1.6. Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Beton.....	6
2.1.1. Pengertian Beton.....	6
2.1.2. Keunggulan dan Kelemahan Beton.....	6
2.1.3. Sifat-Sifat Beton.....	7
2.1.4. Material Pembentukan Beton.....	7
2.2. Sifat Mekanis Beton.....	13
2.2.1. Kuat Tarik Belah.....	13
2.2.2. Hubungan Tegangan-Regangan.....	14
2.2.3. Modulus Elastisitas.....	21
2.2.4. Toughness.....	22
2.3. Penelitian Terdahulu.....	23

BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	27
3.1. Bagan Alir.....	27
3.2. Tempat dan Waktu Penelitian.....	29
3.3. Jenis dan Waktu Penelitian.....	29
3.4. Pemeriksaan Karakteristik Agregat.....	29
3.5. Analisa Rancangan Campuran (<i>Mix Design</i>).....	30
3.6. Alat dan Bahan Penelitian.....	30
3.7. Pembuatan Benda Uji.....	31
3.8. Metode Pemeriksaan <i>Slump Test</i>	33
3.9. Perawatan Benda Uji.....	33
3.11. Pengujian Benda Uji.....	33
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	35
4.1. Karakteristik Material.....	35
4.1.1. Karakteristik Agregat Kasar (Batu Pecah).....	35
4.1.2. Karakteristik Agregat Halus (Pasir).....	35
4.1.3. Karakteristik Batu Bata Tahan Api (<i>Refractory Brick</i>).....	36
4.2. Pengujian Kuat Tarik Belah.....	37
4.3. Hubungan antara Kuat Tarik Belah dan Regangan.....	39
4.4. Hubungan antara Beban dan Waktu	42
4.5. Perhitungan Modulus Elastisitas Tarik	43
4.6. Regangan Elastis Beton.....	45
4.7. Regangan Puncak Beton	46
4.8. Regangan Ultimate Beton	47
4.9. Perhitungan Toughness Index Tarik	49
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	51
4.1. Kesimpulan.....	51
4.2. Saran.....	51
DAFTAR PUSTAKA.....	53
LAMPIRAN.....	56

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Gradasi pasir.....	10
Tabel 2. Metode pengujian karakteristik agregat.....	29
Tabel 3. Mix design $f'c$	30
Tabel 4. Variasi benda uji.....	32
Tabel 5. Hasil pengujian karakteristik agregat kasar (Batu Pecah).....	35
Tabel 6. Hasil pengujian karakteristik agregat halus (Pasir)	36
Tabel 7. Hasil pengujian karakteristik agregat kasar parsial (<i>Refractory Brick</i>) ..	36

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Representasi diagramatik dari hubungan tegangan-regangan untuk beton.....	15
Gambar 2 .Hubungan tegangan-regangan untuk pasta semen, agregat dan beton.	17
Gambar 3. Hubungan tegangan-regangan beton yang diuji dalam kompresi dengan laju regangan konstan.....	18
Gambar 4. Contoh hubungan tegangan regangan dalam kompresi untuk silinder beton dengan kuat tekan hingga 85 MPa.....	19
Gambar 5. Contoh hubungan tegangan-regangan dalam tegangan langsung.....	20
Gambar 6. Area ketangguhan dibawah kurva tegangan – regangan.....	23
Gambar 7. Diagram Alir Penelitian.....	27
Gambar 8. Bahan material campuran beton.....	31
Gambar 9. <i>Curing</i> benda uji.....	33
Gambar 10. Alat akuisis data.....	34
Gambar 11. Detail alat pengujian kuat tarik belah.....	34
Gambar 12. Gradasi ukuran butiran agregat.....	37
Gambar 13. Kuat tarik belah beton dengan persentase penggunaan RB yang berbeda.....	39
Gambar 14. Grafik gabungan hubungan kuat tarik belah dan regangan vertikal dengan mutu beton 21 MPa dan 25 MPa.....	40
Gambar 15. Grafik gabungan hubungan kuat tarik belah dan regangan horizontal dengan mutu beton 21 MPa dan 25 MPa.....	41
Gambar 16. Grafik gabungan hubungan beban dan waktu dengan mutu beton 21 MPa dan 25 MPa.....	42
Gambar 17. Grafik modulus elastisitas tarik dengan mutu beton 21 MPa dan 25 MPa.....	44
Gambar 18. Grafik regangan elastis beton dengan mutu beton 21 MPa dan 25 MPa.....	46
Gambar 19. Grafik regangan puncak dengan mutu beton 21 MPa dan 25 MPa...	47
Gambar 20. Grafik regangan ultimate dengan mutu beton 21 MPa dan 25 MPa..	48
Gambar 21. Grafik toughness index tarik beton dengan mutu beton 21 MPa dan 25 MPa.....	49

DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Singkatan/symbol	Arti dan Keterangan
A	= luas penampang benda uji (mm^2)
D	= diameter benda uji (mm)
Fct	= kuat tarik belah (Mpa)
L	= panjang benda uji (mm)
P	= gaya maksimum (N)
S ₂	= tegangan pada 40% tegangan runtuh (N/mm^2)
S ₁	= tegangan pada saat regangan 0,000050 (N/mm^2)
ϵ_2	= regangan pada saat S ₂
ϵ	= regangan
σ	= tegangan
ϵ_0	= regangan pada tegangan maksimum
E _c	= modulus elastisitas (MPa)
ϵ_L	= regangan horizontal
HI	= pembacaan LVDT 1
H2	= pembacaan LVDDT 2
ϵ_a	= regangan vertikal
RB	= limbah batu bata tahan api atau <i>refractory brick</i>
LVDT	= linier variable displacement transducer
PCC	= portland composite cement
SNI	= standar nasional indonesia
UTM	= universal testing machine

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Beton merupakan salah satu bahan bangunan yang banyak dipakai di Indonesia dalam pembangunan gedung, jembatan, dermaga, dan lain-lain. Menurut SNI 2847:2013, beton didefinisikan sebagai campuran dari bahan penyusunnya yang terdiri dari bahan hidrolis (portland cement), agregat kasar, agregat halus, dan air dengan atau tanpa menggunakan bahan tambah (admixture atau additive). Beton adalah bahan konstruksi yang banyak digunakan memiliki 75% volume yang ditempati oleh agregat, dimana 45% adalah agregat kasar (MS Meddah, S,2010). Tingginya persentase agregat pada komposisi campuran beton menunjukkan bahwa kebutuhan bahan penyusun beton yaitu agregat alami juga tinggi, yang apabila digunakan secara terus-menerus, maka akan mengalami kelangkaan yang akan berdampak terhadap kerusakan lingkungan.

Beberapa alternatif lain yang bisa digunakan dalam mengatasi masalah tersebut seperti penggunaan agregat buatan, penggunaan agregat limbah beton, dan penggunaan limbah industri yaitu *refractory brick* atau limbah batu bata tahan api yang memiliki sifat atau karakteristik yang hampir sama dengan agregat alam. Dari segi nilai ekonomi pun dapat dikatakan bahwa bahan limbah tersebut tidak ada nilainya, namun jika bahan limbah tersebut digunakan dalam campuran beton pada konstruksi bangunan akan memberikan dampak baik yaitu mengurangi pencemaran lingkungan dan mengurangi penggunaan agregat alam.

Refractory brick adalah material konstruksi yang mampu mempertahankan bentuk dan kekuatannya pada temperature tinggi dibawah beberapa kondisi seperti tegangan mekanik dan serangan kimia dari gas-gas panas, cairan atau leburan dan semi leburan dari gelas, logam atau slag. *Refractory brick* selain digunakan sebagai dinding (bahan isolasi konduktif dan/atau termal), juga berfungsi sebagai wadah atau tempat pengolahan bahan pada suhu tinggi. *Refractory brick* dikenal sebagai bahan padat yang tahan terhadap suhu tinggi sekitar 1000°C, oleh karena itu banyak digunakan sebagai lapis penutup tungku pembakaran (*kilen*). Secara umum, ada dua jenis refraktori yaitu tipe magnesium dan alumina (Ardalan B.N, 2017). Meskipun ketahanan

suhu diatas 1000°C , masa pakai *refractory brick* hanya sekitar 4 tahun sehingga menyebabkan banyaknya limbah tersebut. Sekitar 28 juta ton limbah *refractory brick* saat ini dihasilkan setiap tahun. Daur ulang *refractory brick* masih sangat jarang, tetapi sudah mulai mendapat perhatian lebih selama dua dekade terakhir karena masalah lingkungan dan meningkatnya biaya TPA (Liesbeth Horckmans, 2019).

Material *refractory brick* banyak dibutuhkan dan sangat penting fungsinya untuk berbagai industri, salah satunya adalah PT. Vale Indonesia Tbk (PTVI) yaitu perusahaan tambang pengolahan nikel yang beroperasi di Sorowako, Kabupaten Luwu Timur, Provinsi Sulawesi selatan, yang menggunakan *refractory brick* sebagai dinding tungku pembakaran peleburan nikel, disini peran *refractory brick* adalah menjaga suhu didalam tungku tetap stabil, bahkan menahan perubahan suhu yang tiba-tiba atau disebut ketahanankejut termal.

Pengujian kuat tarik belah beton digunakan untuk mengevaluasi ketahanan geser dari komponen struktur yang terbuat dari beton yang menggunakan agregat ringan. Metode pengujian ini mencakup cara penentuan kuat tarik belah benda uji yang divetak berbentuk silinder atau beton inti yang diperoleh dengan cara pengeboran termasuk ketentuan peralatan dan prosedur pengujiannya serta perhitungan kekuatan tarik belahnya (SNI-03-2491-2002).

Berdasarkan latar belakang tersebut penulis mengangkat judul **“PENGARUH PENGGUNAAN LIMBAH BATU BATA TAHAN API TIPE MAGNESIA SEBAGAI AGREGAT KASAR PADA KUAT TARIK BETON”**

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang tersebut, diajukan beberapa masalah pokok dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana perilaku kuat tarik beton yang menggunakan limbah batu bata tahan api tipe magnesia sebagai substitusi agregat kasar.
2. Bagaimana hubungan beban dan waktu pada beton yang menggunakan limbah batu bata tahan api tipe magnesia sebagai substitusi agregat kasar dibawah beban tarik.

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menganalisis perilaku kuat tarik beton yang menggunakan limbah batu bata tahan api tipe magnesita sebagai substitusi agregat kasar.
2. Mengevaluasi hubungan beban dan waktu pada beton yang mengandung limbah batu bata tahan api tipe magnesita sebagai substitusi agregat kasar dibawah beban tarik.

1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini selain untuk menambah ilmu pengetahuan tentang perilaku kuat tarik beton yang menggunakan *refractori brick* tipe magnesita, juga diharapkan penggunaan *refractori brick* pada campuran beton nantinya dapat mengurangi *limbah refractory brick* itu sendiri dan mengurangi penggunaan agregat alami serta dapat menghasilkan beton yang ramah lingkungan dan ekonomis.

1.5. Ruang Lingkup

Mengingat banyak hal yang dapat mempengaruhi dalam suatu perencanaan beton, maka permasalahan dalam penulisan penelitian ini dibatasi oleh hal-hal sebagai berikut :

1. Limbah batu bata tahan api yang digunakan ialah batu bata tahan api tipe magnesita yang berasal dari PT. Vale Indonesia.
2. Batu pecah yang berasal dari PT. Vale Indonesia digunakan sebagai agregat kasar dengan ukuran 10 – 30 mm dan telah memenuhi persyaratan SNI-03-1968-1990.
3. Pasir yang digunakan adalah hasil crushing batu reject, berasal dari PT. Vale Indonesia.
4. Semen yang digunakan pada penelitian ini adalah semen portland komposit (PCC) dan memenuhi standar SNI-7064-2014.
5. Air yang digunakan adalah air yang tersedia di Laboratorium Struktur dan Bahan, Departemen Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin.

6. Pengujian kuat tarik belah, tegangan tarik belah, hubungan beban dan waktu, *Poisson Ratio*, *Toughness* yang menggunakan benda uji berbentuk Silinder dengan ukuran $D = 10\text{cm} \times 20\text{cm}$. jumlah benda uji yang direncanakan adalah 48 sampel dan pengujian dilakukan pada umur 28 hari dan 120 hari.
7. Proses Perawatan (*curing*) yang dilakukan adalah *curing* air

1.6. Sistematika Penulisan

Dalam memudahkan pembahasan hasil penelitian laboratorium tentang PENGARUH PENGGUNAAN REFRAKTORI BRICK SEBAGAI AGREGAT KASAR PADA KUAT TARIK BETON, penulis memberikan gambaran secara garis besar dan secara ringkas sistematika penulisan hasil studi diuraikan dalam komposisi bab-bab sebagai berikut :

Bab I Pendahuluan

Dalam bab ini penulis akan mengemukakan uraian tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan.

Bab II Tinjauan Pustaka

Dalam bab ini penulis akan mengemukakan tentang gambaran umum beton, keunggulan dan kelemahan beton, sifat karakteristik campuran pasir material penyusun beton, faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas beton, perencanaan adukan beton kuat tekan beton, hubungan tegangan regangan nilai modulus elastisitas, poisson rasio dan toughness.

Bab III Metodologi Penelitian

Dalam bab ini penulis akan mengemukakan tentang tinjauan umum penelitian, lokasi dan waktu penelitian, teknik pengumpulan data, bahan penelitian, alat-alat penelitian, pelaksanaan penelitian serta bagan alir penelitian.

Bab IV Hasil Penelitian dan Pembahasan

Dalam bab ini penulis akan mengemukakan tentang hasil penelitian dan mengemukakan pembahasan penelitian sifat – sifat karakteristik material dan perbandingan kuat tekan beton terhadap agregat kasar refraktori batu bata tipe magnesita.

Bab V Kesimpulan dan Saran

Dalam bab ini penulis akan menguraikan tentang kesimpulan dan saran-saran.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton

Perkembangan dunia konstruksi di Indonesia ikut mendorong bertambahnya penggunaan beton sebagai material perkuatan struktur. Selain itu, teknologi beton selalu mengalami perkembangan yang lebih dinamis. Beton adalah sebuah bahan komposit yang terbuat dari kombinasi agregat dan pengikat semen. Bentuk paling umum dari beton adalah beton semen potland, yang terdiri dari agregat mineral (kerikil dan pasir), semen dan air. Beton mongering pencampuran dan peletakan. Sebenarnya, beton tidak menjadi padat karena air menguap, tapi semen berhidrasi, mengelem komponen lainnya bersama dan akhirnya membentuk material seperti batu. Menurut Standar Nasional Indonesia (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).

2.1.1 Keunggulan dan Kelemahan Beton

1. Keunggulan Beton

- a. Beton menahan gaya tekan dengan baik dan tahan terhadap korosi dan korosi dan kondisi lingkungan
- b. Beton segar dapat dengan mudah dibentuk sesuai kebutuhan. Cetakan juga dapat digunakan kembali, yang lebih ekonomis.
- c. Beton segar dapat disemprotkan pada permukaan beton lama yang retak atau diisi ke dalam retakan beton selama perbaikan.
- d. Kemungkinan untuk mengganti beton segar yang memungkinkan untuk memompa beton segar yang memungkinkan untuk dituangkan ke lokasi yang sulit.
- e. Beton tahan terhadap aus dan api, sehingga biaya perawatannya rendah

2. Kelemahan Beton

- a. Beton dianggap tidak mampu menahan gaya tarik, sehingga mudah retak. Oleh karena itu perlu diberi baja tulangan sebagai penahan gaya tarik.

- b. Beton keras menyusut dan mengembang bila terjadi perubahan suhu sehingga perlu dibuat dilatasi (*expansion joint*) untuk mencegah terjadinya retakan-retakan akibat terjadinya perubahan suhu.
- c. Untuk mendapatkan beton kedapa air secara sempurna, harus dilakukan dengan pengerjaan yang teliti.
- d. Beton bersifat getas (tidak daktail) sehingga harus dihitung dan diteliti secara seksama agar setelah dikompositkan dengan baja tulangan menjadi sifat daktail, terutama pada struktur tahan gempa.

2.1.2 Sifat-Sifat Beton

Beton mempunyai karakteristik yang harus dipertimbangkan dalam hubungannya dengan kualitas yang dituntut tujuan suatu konstruksi *tertepentu*. Pendekatan praktis yang paling baik untuk mengusahakan kesempurnaan sifat suatu beton akan berarti suatu pemborosan bilamana dipandangi dari segi ekonomi. Yang paling diharapkan dalam suatu konstruksi ialah dapat memenuhi harapan maksimal, dengan tepat mengikuti variasi sifat-sifat beton, dan tidak hanya terpaku pada suatu pandangan saja, misalnya kekuatan yang harus semaksimal mungkin.

Usaha untuk mencapai kekuatan maksimum bukan merupakan satu-satunya kriteria perencanaan, ukuran dari kuat hancur kubus atau silinder beton sebagai bahn uji mencerminkan suatu usaha untuk mempertahankan mutu standar yang seragam. Karena sifat-sifat lain dari beton pada campuran tertentu tercermin dalam kuat kubus uji, maka satu-satunya pengujian ini masih dipandang memadai dan memberikan informasi yang cukup.

2.1.3 Material Pembentukan Beton

Untuk memahami dan mempelajari seluruh perilaku elemen gabungan diperlukan pengetahuan tentang karakteristik masing-masing komponen. Beton dihasilkan dari sekumpulan interaksi mekanis dan kimiawi sejumlah material pembentukannya. Dengan demikian perlu dibicarakan fungsi dari masing-masing komponen tersebut sebelum mempelajari beton secara keseluruhannya.

1. Semen

Semen berasal dari kata *Caementum* yang berarti bahan perekat yang mampu memampatkan atau mengikat bahan-bahan padat menjadi satu

kesatuan yang kokoh atau suatu produk yang mempunyai fungsi sebagai bahan perekat antara dua atau lebih bahan sehingga, menjadi suatu bagian yang kompak atau dalam pengertian yang luas adalah material plastis yang memberikan sifat rekat antara batuan-batuan konstruksi bangunan. Usaha untuk membuat semen pertama kali dilakukan dengan cara membakar batu kapur dan tanah liat. Joseph Aspadain yang merupakan orang inggris, pada tahun 1824 mencoba membuat semen dari kalsinasi campuran batu kapur dengan tanah liat yang telah dihaluskan, digiling, dan dibakar menjadi lelehan dalam tungku, sehingga terjadi penguraian batu kapur (CaCO_3) menjadi batu tohor (CaO) dan karbon dioksida (CO_2). Batu kapur tohor (CaO) bereaksi dengan senyawa-senyawa lain membentuk klinker kemudian digiling sampai menjadi tepung yang kemudian dikenal dengan Portland. Semen Portland (menurut SNI 15-2049-2015) adalah semen hidrolis dengan menggiling terak semen Portland terutama yang terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambah berupa satu atau lebih kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain. Jenis dan penggunaannya adalah sebagai berikut :

- a. Tipe I yaitu semen portland untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti yang disyaratkan pada jenis-jenis lain.
- b. Tipe II yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau kalor hidrasi sedang.
- c. Tipe III semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi.
- d. Tipe IV yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kalor hidrasi rendah.
- e. Tipe V yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat.

Semen tipe I digunakan untuk bangunan-bangunan umum yang tidak memerlukan persyaratan khusus. Semen tipe II yang memiliki kadar C3A tidak lebih dari 8% digunakan untuk konstruksi bangunan dan beton yang

terus-menerus berhubungan dengan air kotor atau air tanah atau untuk pondasi yang tertanam di dalam tanah yang mengandung air agresif (garam-garam sulfat) dan saluran air buangan atau bangunan yang berhubungan langsung dengan rawa. Semen tipe III, memiliki kadar C3A serta C3S yang tinggi dan butirannya digiling sangat halus, sehingga cepat mengalami proses hidrasi. Semen jenis ini dipergunakan pada daerah yang bertemperatur rendah, terutama pada daerah yang mempunyai musim dingin (winter season). Semen tipe IV mempunyai panas hidrasi yang rendah, kadar C3S nya dibatasi maksimum sekitar 35% dan kadar C3A nya maksimum 5%. Semen tipe V digunakan untuk bangunan yang berhubungan dengan air laut, air buangan industri, bangunan yang terkena pengaruh gas atau uap kimia yang agresif serta untuk bangunan yang berhubungan dengan air tanah yang mengandung sulfat dalam prosentase yang tinggi total alkali yang terkandung dalam semen dalam campuran beton harus dibatasi sekitar 0.5% - 0.6% (Stanton, 1940).

2. Agregat Halus

Agregat halus (pasir) adalah bahan yang berbahan mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran beton yang memiliki ukuran butiran kurang dari 5 mm atau lolos saringan No.4 dan tertahan pada saringan No.200. Agregat halus (pasir) berasal dari hasil disintegrasi alami dari batuan alam atau pasir buatan yang dihasilkan dari alat pemecah batu (*stone crusher*).

Agregat halus yang digunakan harus mempunyai gradasi yang baik, karena akan berfungsi untuk mengisi ruang-ruang kosong yang tidak dapat diisi oleh material lain sehingga menghasilkan beton yang padat disamping untuk mengurangi penyusutan. Analisa saringan akan menunjukkan kategori jenis dari agregat halus tersebut. Melalui analisa saringan maka akan diperoleh angka *FinenessModulus*.

Melalui *Fineness Modulus* ini dapat digolongkan 3 jenis pasir yaitu :

Pasir kasar : $2,9 < FM < 3,2$

Pasir sedang : $2,6 < FM < 2,9$

Pasir halus : $2,2 < FM < 2,6$

Menurut peraturan pemerintah di Indonesia saat ini (dalam SK-SNI-T-15-1991-03) kekasaran pasir dapat dibagi menjadi 4 kelompok menurut gradasinya, yaitu pasir halus, agak halus, agak kasar, dan kasar sebagaimana tampak Tabel 2.1. Adapun gradasi pasir yang baik sebagaimana masuk di dalam batas-batas yang tercantum pada Tabel 2.1.

Tabel 1. Gradasi pasir

Lubang Ayakan (mm)	Porsentase Berat Butir yang Lewat Ayakan			
	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	05-20	08-30	12-40	15 – 50
0,15	0 – 10	0 – 10	0 – 10	0 – 15

Sumber : Teknologi Beton (Ir. Mulyono. MT)

Keterangan :

Daerah I = Pasir Kasar Daerah III = Pasir Agak Halus

Daerah II = Pasir Agak Kasar Daerah IV = Pasir Halus

3. Agregat Kasar

Agregat kasar yang digunakan untuk pembuatan beton dan akan mengalami basah dan lembab terus menerus atau yang akan berhubungan dengan tanah basah, tidak boleh mengandung bahan yang reaktif terhadap alkali dalam semen, yang jumlahnya cukup dapat menimbulkan pemuaian yang berlebihan di dalam mortar atau beton. Agregat adalah butiran mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran mortar atau beton. Agregat ini kira-kira menempati sebanyak 70 % volume mortar atau beton. Walaupun namanya hanya sebagai pengisi, akan tetapi agregat sangat berpengaruh terhadap sifat-sifat mortar/betonnnya, sehingga pemilihan, agregat merupakan bagian penting dalam pembuatan mortar/beton.

Agregat kasar merupakan bahan pengisi dalam beton yang memiliki ukuran butir lebih dari 4,76 mm atau tertahan pada saringan No.4. Untuk pembuatan beton, agregat kasar harus memenuhi persyaratan yang telah ditetapkan dalam SK SNI S-04-1989-F yaitu:

- a. Agregat kasar harus terdiri dari butir-butir keras dan tidak berpori;
- b. Agregat kasar yang butirannya pipih hanya dapat digunakan jika butir-butir pipihnya tidak melampaui 20% dari berat butir seluruhnya;
- c. Butir-butir agregat kasar harus kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh cuaca;
- d. Agregat kasar tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1% terhadap berat keringnya. Jika kadar lumpur agregat kasar melampaui 1% maka agregat harus dicuci terlebih dahulu sebelum digunakan;
- e. Agregat kasar tidak boleh mengandung zat-zat yang dapat merusak beton seperti zat-zat yang reaktif terhadap alkali;
- f. Nilai modulus kehalusan agregat kasar berada pada rentang 6,0 – 7,1.

Agregat harus mempunyai bentuk yang baik (bulat atau mendekati kubus), bersih, keras, kuat dan gradasinya baik. Gradasi agregat ialah distribusi ukuran butiran dari agregat. Bila butir-butir agregat mempunyai ukuran butir yang sama (seragam) volume pori akan besar sebaliknya jika ukuran butir-butirnya bervariasi akan terjadi volume pori yang kecil. Hal ini karena butiran yang kecil mengisi pori diantara butiran yang lebih besar, sehingga pori-porinya menjadi lebih sedikit dengan kata lain kepampatan tinggi.

4. Refractory Brick

Refraktori merupakan bahan padat yang dapat menahan suhu tinggi dan mempertahankan fungsi mekanisnya untuk jangka waktu tertentu dalam segala keadaan, bahkan jika bersentuhan dengan cairan maupun gas korosif. Refraktori sangat diperlukan untuk semua kegiatan yang memerlukan ketahanan terhadap suhu tinggi, misalnya produksi logam, semen, kaca, serta keramik (Horckmans, L. *et al.*, 2019). *Refractory brick* adalah batu bata tahan api yang termasuk dalam bahan keramik yang memiliki kemampuan untuk mempertahankan bentuk dan kekuatannya pada berbagai kondisi termasuk pada kondisi bersuhu tinggi, cairan bersifat korosif termasuk zat – zat kimia lainnya, gas – gas panas, tahan terhadap abrasi, serta tegangan mekanik akibat panas (Kavas, T. *et al.*, 2006).

Terdapat berbagai macam refraktori, yang dirancang untuk memenuhi persyaratan suhu dan proses dari setiap pengaplikasian. Refraktori

diaplikasikan dalam berbagai cara, yang paling umum adalah berdasarkan metode pemasangan (berbentuk atau tidak berbentuk), jenis ikatan, dan komposisi kimia (asam, basa, atau netral). Klasifikasi menjadi asam, basa, atau netral berdasarkan dari interaksi bahan baku utama dengan air. Refraktori asam seperti bahan alumina-silikat, silika, dan zircon biasanya digunakan untuk suhu operasi yang lebih rendah daripada refraktori lain dan cenderung lebih ekonomis untuk diproduksi. Refraktori netral seperti alumina dan kromia, digunakan secara luas oleh industri logam karena suhu lelehnya yang tinggi, harga sedang, dan memiliki kemampuan untuk digunakan baik pada lingkungan basa maupun lingkungan asam, selain itu refraktori jenis alumina merupakan bahan netral yang ketersediaannya lebih banyak apabila dibandingkan dengan refraktori kromia (Fang, H. *et al.*, 1999).

Refraktori bauksit (kandungan alumina tinggi) pada umumnya digunakan pada industri baja misalnya pada tungku busur listrik dan dalam industri semen dan kapur misalnya lapisan tanur putar (Horckmans, L. *et al.*, 2019). *Refractory brick* atau batu bata tahan api yang digunakan pada penelitian ini merupakan refraktori tipe alumina dari jenis *furnace (roof dan sidewall)* yang berasal dari bekas tungku pembakaran nikel tahan api, yang penggunaannya akan berperan sebagai substitusi parsial agregat kasar pada campuran beton dengan ukuran maksimal 14 mm dan 28 mm melalui pemecahan secara manual menggunakan palu besi.

5. Air

Salah satu bahan penting pembuatan beton adalah air. Air sangat diperlukan pada saat pembuatan beton untuk membantu memicu reaksi kimia pada semen, air berfungsi membasahi agregat sehingga memberikan kemudahan dalam pekerjaan beton. Oleh karena itu, air sangat diperlukan untuk memulai reaksi pada semen, serta sebagai bahan pelumas antar butir-butir pada agregat agar mudah dikerjakan dan dipadatkan.

Air yang dapat diminum pada umumnya bisa digunakan sebagai campuran beton. Air yang digunakan sebagai campuran haruslah bersih, tidak boleh mengandung minyak, asam, alkali, zat organik atau bahan lainnya yang dapat merusak struktur pada beton. Dan bila dipakai dalam

campuran beton akan menurunkan kualitas pada beton, bahkan dapat mengubah sifat dari beton yang dihasilkan. Pemakaian air untuk beton sebaiknya memenuhi persyaratan (PBI 1971) :

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

Menurut SNI-03-2847-2002 bahwa air dapat digunakan pada campuran beton haruslah memenuhi syarat sebagai berikut :

- a. Pada campuran beton Air yang digunakan harus bersih dan bebas dari bahan – bahan merusak yang mengandung oli, asam, alkali, garam, bahan organik atau bahan – bahan lainnya yang dapat merugikan beton atau tulangan.
- b. Air pencampur yang dapat digunakan pada beton prategang atau dalam beton yang tertanam logam aluminium, termasuk air bebas yang terkandung dalam agregat, tidak boleh mengandung ion klorida dalam jumlah yang bisa membahayakan.
- c. Air yang tidak dapat diminum tidak boleh dipergunakan pada pembuatan beton, kecuali : - Pemilihan proporsi campuran pada beton harus didasarkan dengan campuran beton yang menggunakan dari air sumber yang sama.

2.2 Sifat Mekanis Beton

2.2.1 Kuat Tarik Belah

Berdasarkan SNI 03-2491-2002, yang menjelaskan bahwa metode pengujian ini mencakup cara penentuan kuat tarik belah benda uji yang dicetak berbentuk silinder atau beton inti yang diperoleh dengan cara pengeboran termasuk ketentuan peralatan dan prosedur pengujiannya serta perhitungan kekuatan tarik belahnya. Pengujian kuat tarik belah digunakan untuk mengevaluasi ketahanan geser dari komponen struktur yang terbuat dari beton yang menggunakan agregat

ringan. Benda-benda uji yang dibuat harus memenuhi persyaratan ukuran, pencetakan, dan perawatan yang ditetapkan dalam SNI 03-2493-1991 (benda uji yang dibuat di laboratorium). Benda uji yang diperlihara dalam kondisi lembab, pada tenggang waktu menunggu pengujiannya, harus dijaga agar tetap lembab dengan jalan yang menyelimutinya dengan kin atau karung basah dan harus segera diuji dalam keadaan lembab untuk evaluasi kekuatan beton ringan, harus diikuti prosedur perawatan yaitu pengujian, benda uji pada umur 28 hari harus dalam kondisi kering udara setelah sebelumnya dilakukan pemeliharaan lembab selama 7 hari kemudian dikeringkan selama 21 hari temperature 23 ± 2^0 dan kelembaban nisbi $50 \pm 5\%$. Nilai kuat tarik belah beton dapat dihitung dengan rumus sbb:

$$F_{ct} = \frac{2 P}{L D} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

F_{ct} = Kuat tarik – belah dalam MPa

P = Beban uji maksimum (beban belah / hancur) dalm newton (N) yang ditunjukkan mesin uji tekan

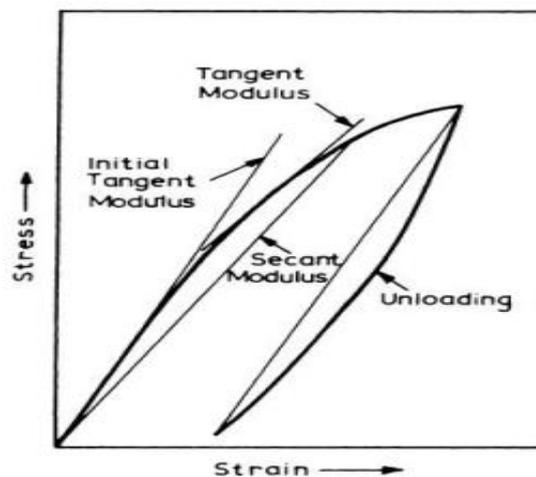
L = Panjang benda uji dalam mm

D = Diameter benda uji dalam mm

2.2.2 Hubungan Tegangan-Regangan

Berdasarkan buku A. M. Neville, Suatu bahan dikatakan elastis sempurna jika regangan muncul dan menghilang dengan segera pada saat aplikasi dan penghilangan tegangan. Definisi ini tidak menyiratkan hubungan tegangan-regangan linier: perilaku elastis yang digabungkan dengan hubungan tegangan-regangan non-linear adalah ditunjukkan, misalnya, oleh kaca dan beberapa batuan. Ketika beton mengalami pembebanan berkelanjutan, regangan meningkat dengan waktu, yaitu beton menunjukkan rangkak. Selain itu, apakah dikenakan Selain itu, baik dibebani atau tidak, beton menyusut pada saat pengeringan, mengalami penyusutan. Besarnya susut dan rangkak memiliki urutan yang sama dengan regangan elastis di bawah kisaran tegangan yang biasa, sehingga beragam jenis regangan harus, setiap saat, diperhitungkan. Dari gambar 1, menunjukkan representasi diagram dari hubungan tegangan-regangan untuk spesimen beton yang dimuat dan dibongkar dalam kompresi atau tegangan hingga tegangan di

bawah kekuatan ultimit. Dalam uji kompresi, bagian cekung kecil dari kurva di awal pembebanan kadang-kadang dijumpai; ini disebabkan oleh penutupan retakan susut halus yang sudah ada sebelumnya. Dari gambar 1, dapat terlihat bahwa istilah modulus elastisitas Young dapat, secara ketat hanya dapat diterapkan pada bagian lurus dari kurva tegangan-regangan kurva, atau, bila tidak ada bagian lurus, ke garis singgung ke kurva di titik asal. Ini adalah modulus singgung awal, tetapi ini adalah kepentingan praktis yang terbatas. Dimungkinkan untuk menemukan modulus tangen di titik mana pun pada kurva tegangan-regangan, tetapi modulus ini hanya berlaku untuk perubahan yang sangat kecil pada beban di atas atau di bawah beban di mana modulus tangen dipertimbangkan.



Sumber: A. M. Neville

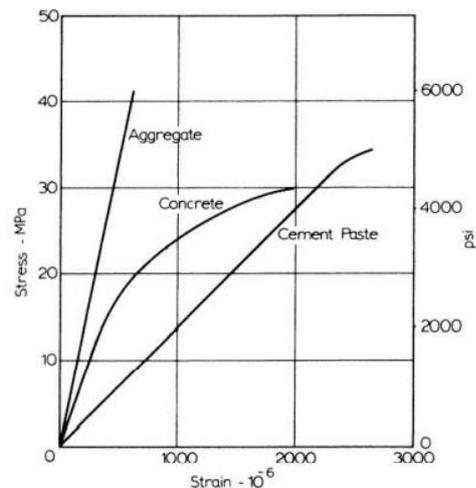
Gambar 1. Representasi diagramatik dari hubungan tegangan-regangan untuk beton

Besarnya regangan yang diamati dan kelengkungan hubungan tegangan-regangan bergantung, setidaknya sebagian, pada laju penerapan stres. Ketika beban diterapkan dengan sangat cepat, misalnya, dalam waktu kurang dari 0,01 detik, regangan yang terekam sangat berkurang, dan kelengkungan kurva tegangan-regangan menjadi sangat kecil. Sebuah peningkatan waktu pemuatan dari 5 detik menjadi sekitar 2 menit dapat meningkatkan regangan hingga 15 persen, tetapi dalam kisaran 2 hingga 10 (atau bahkan 20) menit - waktu yang biasanya diperlukan untuk menguji specimen dalam mesin uji biasa - peningkatan regangan sangat kecil. Hubungan antara laju regangan dan kekuatan, yang dibahas pada hal. 621, mungkin relevan. Peningkatan regangan saat beban, atau sebagian

dari beban, bekerja disebabkan oleh rangkai beton, tetapi ketergantungan regangan sesaat pada kecepatan pembebanan membuat demarkasi antara elastis dan rangkai regangan menjadi sulit. Untuk tujuan praktis, perbedaan yang sewenang-wenang adalah dibuat: deformasi yang terjadi selama pembebanan dianggap elastis, dan peningkatan regangan berikutnya dianggap sebagai mulur.

Modulus elastisitas yang memenuhi persyaratan ini adalah modulus secant dari Gambar 1, yang juga dikenal sebagai modulus akord. Modulus secant adalah modulus statis karena ditentukan dari eksperimen hubungan tegangan-regangan pada silinder uji, berbeda dengan modulus dinamis, yang dibahas pada hal. 421. Karena modulus sekan berkurang dengan bertambahnya tegangan, tegangan di mana modulus telah ditentukan harus selalu dinyatakan. Untuk tujuan perbandingan, tegangan maksimum yang diterapkan adalah dipilih sebagai proporsi tetap dari kekuatan ultimate. Proporsi ini ditentukan sebagai 33 persen dalam BS 1881-121: 1983, dan sebagai 40 persen persen dalam ASTM C 469-02. Untuk menghilangkan rangkai, dan juga untuk mencapai tempat duduk pengukur, setidaknya dua siklus pra-pemuatan ke tegangan maksimum diperlukan. Tegangan minimum harus sedemikian rupa sehingga silinder uji tidak bergerak. Minimum ini ditentukan oleh BS 1881-121: 1983 sebagai 0,5 MPa; ASTM C 469-02 menentukan minimum regangan 50×10^{-6} . Kurva tegangan-regangan pada yang ketiga atau keempat pembebanan hanya menunjukkan kelengkungan yang kecil. Menarik untuk dicatat bahwa dua komponen beton, yaitu, pasta semen terhidrasi dan agregat, ketika dikenakan secara individual beban, menunjukkan hubungan tegangan-regangan linier yang masuk akal (Gambar. 2.2), meskipun beberapa saran tentang non-linearitas dari hubungan tegangan-regangan hubungan tegangan-regangan dari pasta semen yang terhidrasi telah dibuat.9.100 Alasan hubungan melengkung pada material komposit beton-beton terletak pada adanya antarmuka antara semen pasta dan agregat dan dalam pengembangan retakan mikro ikatan pada antarmuka tersebut.9.42 Perkembangan progresif dari perkembangan progresif dari retak mikro dikonfirmasi oleh radiografi neutron.

9.62



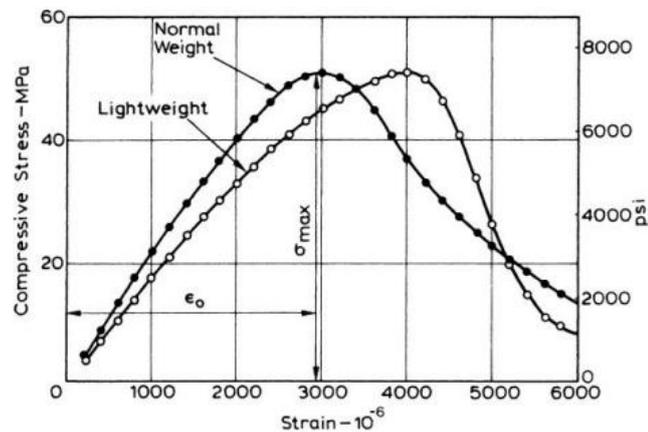
Sumber: A. M Neville

Gambar 2. Hubungan tegangan-regangan untuk pasta semen, agregat dan beton

Perkembangan retak mikro berarti bahwa regangan yang tersimpan yang tersimpan diubah menjadi energi permukaan permukaan retak baru. Karena retakan berkembang secara progresif pada permukaan sudut yang bervariasi dengan beban yang diberikan, dan merespon terhadap tegangan lokal, ada peningkatan progresif dalam intensitas tegangan lokal dan dalam besarnya regangan. Dengan kata lain, konsekuensi dari pengembangan retakan adalah pengurangan area efektif menahan beban yang diterapkan, sehingga tegangan lokal lebih besar dari tegangan nominal berdasarkan penampang total spesimen. Perubahan ini berarti bahwa regangan meningkat pada tingkat yang lebih cepat daripada tegangan nominal yang diterapkan, dan kurva tegangan-regangan terus berlanjut membengkok, dengan perilaku pseudo-plastis yang nyata. 9.43 Ketika tegangan yang diberikan meningkat melebihi sekitar 70 persen dari kekuatan ultimit, retak mortar (yang menghubungkan ikatan retak) berkembang dan kurva tegangan-regangan melengkung dengan kecepatan yang meningkat. Pengembangan sistem retak menerus mengurangi jumlah jalur pembawa beban 9.65 dan, akhirnya, itu kekuatan ultimit spesimen tercapai. Ini adalah puncak dari kurva tegangan-regangan.

Jika mesin uji memungkinkan pengurangan beban yang diterapkan, maka regangan akan terus meningkat dengan penurunan nominal yang diterapkan stres. Ini adalah bagian pasca-puncak kurva tegangan-regangan yang mewakili pelunakan regangan beton. Namun, yang diamati bagian yang menurun dari kurva

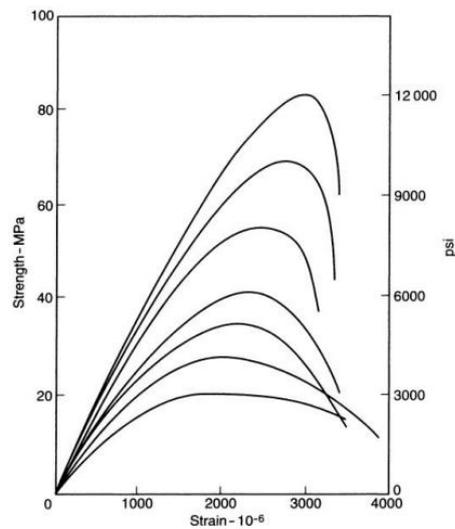
tegangan-regangan bukanlah material properti 9.65 tetapi dipengaruhi oleh kondisi pengujian. Faktor utama yang mempengaruhi faktor yang mempengaruhi utama adalah kekakuan mesin uji dalam kaitannya dengan kekakuan benda uji dan laju regangan. 9.67 Tipikal kurva tegangan-regangan lengkap ditunjukkan pada gambar. 3. 9.36



Sumber: A. M Neville

Gambar 3. Hubungan tegangan-regangan beton yang diuji dalam kompresi dengan laju regangan konstan

Dapat dicatat bahwa, jika kurva tegangan-regangan berakhir tiba-tiba di puncaknya, material akan diklasifikasikan sebagai rapuh. Semakin tidak curam bagian yang menurun dari kurva tegangan-regangan semakin ulet perilaku. Jika kemiringan di luar puncak adalah nol, material akan dikatakan plastis sempurna. Dalam desain struktural beton bertulang, seluruh tegangan-regangan tegangan-regangan, sering kali dalam bentuk ideal, harus dipertimbangkan. Untuk alasan ini, perilaku beton yang memiliki kekuatan yang sangat tinggi adalah dari kepentingan utama. Beton semacam itu mengembangkan jumlah yang lebih kecil retak daripada beton berkekuatan normal selama semua tahap pembebanan; 9.66 sebagai konsekuensinya, bagian naik dari tegangan-regangan kurva lebih curam dan linier hingga proporsi yang sangat tinggi dari yang terakhir kekuatan. Bagian turun dari kurva juga sangat curam (lihat gambar 4) sehingga beton mutu tinggi lebih rapuh daripada beton biasa, dan memang kegagalan eksplosif dari bagian lokal specimen beton mutu tinggi yang diuji dalam kompresi sudah sering terjadi ditemui. Namun, kerapuhan yang tampak dari beton mutu tinggi beton mutu tinggi tidak selalu tercermin dalam perilaku anggota beton bertulang yang dibuat dengan beton tersebut. 9.63,9.6

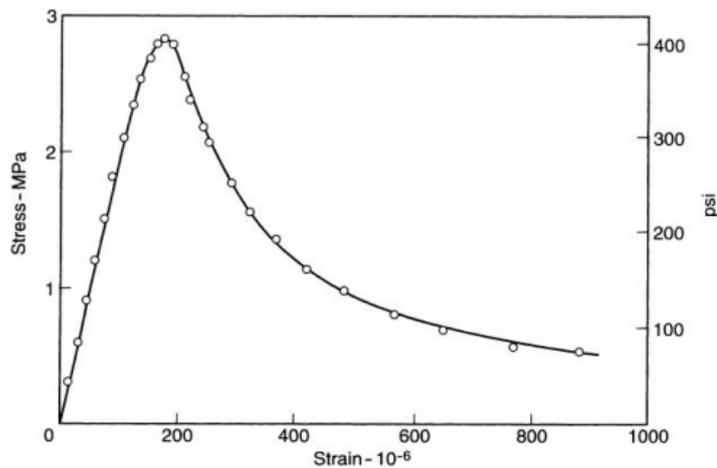


Sumber: A. M Neville

Gambar 4. Contoh hubungan tegangan-regangan dalam kompresi untuk silinder beton dengan kuat tekan hingga 85 MPa

Perilaku beton mutu tinggi juga menarik untuk diperhatikan sehubungan dengan regangan pada berbagai tingkat tegangan. Jika tegangan yang dipertimbangkan, misalnya tegangan dalam layan, dinyatakan sebagai fraksi dari kekuatan ultimit, yang disebut sebagai rasio tegangan/kekuatan, maka pengamatan berikut ini dapat dilakukan. Pada rasio tegangan/kekuatan yang sama, semakin kuat beton maka semakin besar regangannya. Pada tegangan maksimum, yaitu pada tegangan yang sesuai dengan kekuatan ultimit, pada beton 100 MPa (15.000 psi), regangan biasanya 3×10^{-3} sampai 4×10^{-3} ; pada beton 20 MPa (3000 psi), regangan sekitar 2×10^{-3} . Namun, di bawah tekanan yang sama, berapapun kekuatannya, beton yang lebih kuat menunjukkan regangan yang lebih rendah. Oleh karena itu, beton berkekuatan tinggi memiliki modulus elastisitas yang lebih tinggi, seperti terlihat pada Gambar 4. Secara teoritis, kita dapat mengamati bahwa perilaku ini berbeda dengan perilaku baja dengan mutu yang berbeda, mungkin karena kekuatan pasta semen terhidrasi diatur oleh rasio gel/ruang, yang dapat diperkirakan juga mempengaruhi kekakuan material semen. Di sisi lain, kekuatan baja berhubungan dengan struktur dan batas-batas kristal tetapi tidak dengan rongga, sehingga kekakuan material tidak terpengaruh oleh kekuatannya. Beton agregat ringan menunjukkan bagian kurva tegangan-regangan yang lebih curam, 9.36 (lihat Gambar 3) yang berarti, beton ini memiliki perilaku yang lebih rapuh dibandingkan beton dengan berat normal. Kurva tegangan-regangan pada

tegangan mirip dengan kurva tegangan-regangan pada kompresi (lihat Gambar 5) tetapi diperlukan mesin uji khusus. Pada tegangan langsung, pengembangan retak memiliki efek mengurangi luas efektif yang menahan tegangan dan meningkatkan kontribusi retak terhadap regangan keseluruhan. Hal ini mungkin menjadi alasan mengapa penyimpangan dari linieritas hubungan tegangan-regangan pada tegangan terjadi pada rasio tegangan/kekuatan yang sedikit lebih rendah dibandingkan pada kompresi.



Sumber: A. M Neville

Gambar 5. Contoh hubungan tegangan-regangan dalam tegangan langsung (berdasarkan ref. 9.61)

Ekspresi untuk kurva tegangan-regangan,Karena bentuk yang tepat dari seluruh kurva tegangan-regangan untuk beton bukanlah sifat material itu sendiri, tetapi tergantung pada pengaturan pengujian, maka tidak banyak hal yang sangat penting dalam memformulasikan persamaan untuk hubungan tegangan-regangan. Hal ini tidak berarti menyangkal kegunaan persamaan tersebut dalam analisis struktur. Berbagai upaya untuk mengembangkan persamaan telah dilakukan, tetapi mungkin persamaan yang paling berhasil adalah yang disarankan oleh Desayi dan Krishnan:9.44

$$\sigma = \frac{E\varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2} \dots\dots\dots(5)$$

di mana

ε = regangan

σ = tegangan

ε_0 = regangan pada tegangan maksimum, dan

E = modulus tangen awal, diasumsikan dua kali modulus singgung pada tegangan maksimum σ maks, yaitu

$$E = \frac{2\sigma_{max}}{\epsilon_0} \dots\dots\dots(6)$$

Asumsi terakhir dipertanyakan karena baik σ_{max} dan ϵ_0 sangat dipengaruhi oleh kondisi pengujian, dan bentuk persamaan yang lebih umum yang tidak dibatasi oleh asumsi ini telah dikembangkan oleh Carreira dan Chu.9.67

Ekspresi untuk modulus elastisitas, Tidak diragukan lagi bahwa modulus elastisitas meningkat seiring dengan peningkatan kuat tekan beton, tetapi tidak ada kesepakatan mengenai bentuk hubungan yang tepat. Hal ini tidak mengherankan, mengingat fakta bahwa modulus elastisitas beton dipengaruhi oleh modulus elastisitas agregat dan proporsi volumetrik agregat dalam beton. Yang pertama jarang diketahui sehingga beberapa ekspresi, misalnya ACI 318- 029.98 mengijinkan modulus elastisitas agregat dengan koefisien yang merupakan fungsi dari kepadatan beton, biasanya kepadatan dipangkatkan dengan pangkat 1,5. Yang dapat dikatakan dengan pasti adalah bahwa peningkatan modulus elastisitas beton secara progresif lebih rendah daripada peningkatan kuat tekan. Menurut ACI 318-029.98, modulus sebanding dengan kekuatan yang dipangkatkan dengan pangkat 0,5. Ekspresi untuk modulus elastisitas beton, E_c , dalam pound per inci persegi, yang direkomendasikan oleh ACI 318-029.98 untuk perhitungan struktural, yang berlaku untuk beton dengan berat normal, adalah

$$E_c = 57\,000(f'_c)^{0.5} \dots\dots\dots(7)$$

di mana :

kekuatan tekan silinder uji standar dalam pound per inci persegi.

Ketika E_c dinyatakan dalam GPa dan dalam MPa, ekspresinya adalah $E_c = 4.73(\)^{0.5}$

2.2.3 Modulus elastisitas

Modulus elastisitas merupakan rasio tegangan terhadap regangan di bawah batas proporsional material. Proporsi campuran beton yang digunakan turut mempengaruhi nilai modulus elastisitas yang diperoleh. Menurut (Baradaran-Nasiri & Nematzadeh, 2017), menyatakan bahwa nilai modulus elastisitas turut dipengaruhi oleh proporsi campuran, rasio dari agregat kasar dan halus, kualitas material yang digunakan, rasio air dan semen, suhu, serta perawatan beton.

Nilai modulus elastisitas dari beton dapat diperoleh dari hasil pengujian di laboratorium menggunakan alat compressometer yang dipasang pada benda uji beton silinder. Berdasarkan ASTM C469 (2014) nilai modulus elastisitas dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0,000050} \dots\dots\dots(8)$$

Dengan pengertian:

- E_c = Modulus elastisitas beton (MPa)
- S_2 = Tegangan pada saat 40% dari beban maksimum beton (MPa)
- S_1 = Tegangan pada saat regangan mencapai $\varepsilon_1 = 0,00005$ (MPa)
- ε_2 = Regangan yang dihasilkan pada saat S_2

Selain itu, nilai modulus elastisitas dapat dihitung menggunakan rumus empirik yang diberikan dalam SNI 2847 (2019), yaitu sebagai berikut:

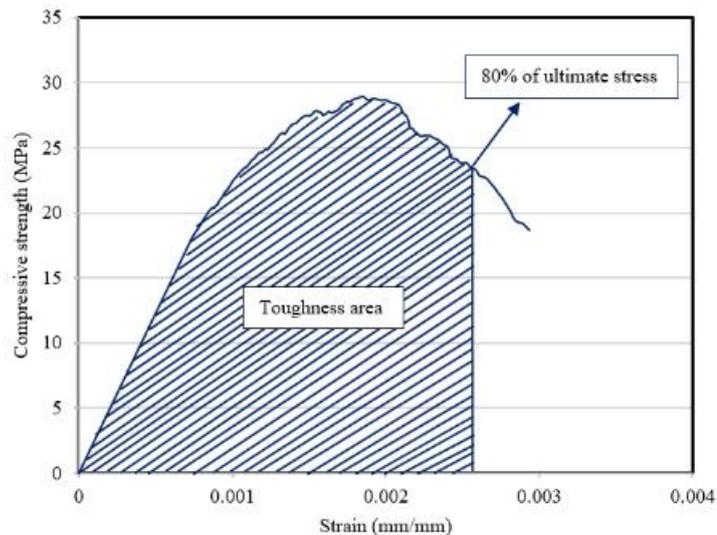
$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \dots\dots\dots(9)$$

Dengan pengertian:

- E_c = Modulus elastisitas beton (MPa)
- f'_c = Kuat tekan beton (MPa)

2.2.4 Toughness

Toughness adalah kemampuan material untuk menyerap energi dan mendapatkan deformasi plastis tanpa terjadi. Nilai toughness benda uji mortar dihitung sebagai area di bawah kurva tegangan-regangan sampai dengan regangan ultimit seperti yang ditunjukkan pada gambar menentukan area tertentu di bawah kurva tegangan-regangan sebesar 80% untuk tegangan ultimit di area pasca-puncak yang diberikan (Emad A.H. Alwesabi, dkk, 2022).



Sumber : Mahmoud Abu-Saleem, dkk (2021)

Gambar 6. Area ketangguhan di bawah kurva tegangan - regangan

2.3 Penelitian Terdahulu

Penelitian ini dikembangkan dengan menggunakan berbagai referensi yang berkaitan dengan pokok bahasan yang sedang dibahas. Penggunaan referensi dimaksudkan untuk memberikan batasan system yang nantinya dapat dikembangkan lebih lanjut, mengacu pada referensi yang digunakan, diharapkan pengembangan system nantinya dapat menghasilkan system baru yang belum ada pada referensi sebelumnya.

Paula B. Cachim, dkk (2009) penelitian ini 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 tarik belah, modulus elastisitas dan perilaku tegangan regangan beton keras. Rasio pergantian agregat alami sebesar 15% dan 30% diselidiki serta rasio air semen 0,45 dan 0,5. Indeks kekuatan digunakan untuk menilai eektivitas 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 diportugal. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa sisa keramik dapat digunakan sebagai pengganti sebagian agregat alam pada beton tanpa pengurangan sifat beton untuk penggantian 15% dan pengurangan hingga 20% untuk penggantian 30%. Jenis dan proses

pembuatan batu bata tampaknya mempengaruhi sifat-sifat beton yang dihasilkan, sifat dan estetika beton dengan batu bata menunjukkan kemungkinan penggunaan beton jenis ini dalam aplikasi pracetak.

Ji, Y. *et al.*, (2022) mempelajari tentang sifat - sifat mekanik dan *micro-interfacial* beton daur ulang. Penelitian ini membuat benda uji beton dengan variasi campuran agregat kasar batu bata daur ulang (RBCA) 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%. Kuat tekan, regangan puncak, dan modulus elastisitas, benda uji beton diuji dan dianalisis begitupun dengan uji mekanis turut dilakukan untuk mengevaluasi sifat dan perilaku beton, kemudian dikombinasikan dengan analisis numerik, distribusi tegangan serta kerusakan. Selanjutnya parameter kandungan RBCA dan ketebalan zona transisi antarmuka dianalisis untuk memprediksi perilaku mekanis beton RBCA. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai slump dari beton daur ulang segar kurang dari 50 mm apabila menggunakan kandungan RBCA melebihi 50%, berat jenis beton 15,55% lebih rendah dari beton biasa pada saat menggunakan kandungan RBCA 100%. Nilai kuat tekan beton, nilai kuat tarik belah dan modulus elastisitas kubus RBCA menurun dengan meningkatnya kandungan RBCA, sedangkan regangan puncak beton mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan kandungan RBCA.

Gomes *et al.*, (2014) menyajikan hasil program eksperimental untuk mengevaluasi kelayakan beton yang dibuat ketika berbagai rasio agregat alami kasar (CNA) diganti dengan agregat beton daur ulang kasar (CRCA), agregat batu dan mortar keramik daur ulang kasar (CRMMA), atau keduanya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggabungan CRCA dan CRCA dan CRMMA secara simultan tidak berpengaruh terhadap kuat tekan. Namun, properti ini berkurang ketika hanya CRMMA yang digabungkan. Pengurangan kekuatan tekan sebesar 23,6% diperoleh ketika 50% CRMMA digunakan. Kekuatan tarik belah tidak terpengaruh oleh penggabungan CRCA tetapi dipengaruhi oleh penggabungan CRMMA. Campuran dengan 50% CRMMA menunjukkan penurunan kekuatan tarik sebesar 20,1%. Setiap jenis beton agregat daur ulang mengalami penurunan modulus elastisitas secara linier seiring dengan meningkatnya rasio penggantian CNA dengan agregat daur ulang kasar. Penggunaan CRCA 100% menyebabkan penurunan modulus elastisitas sebesar 30%. Pada campuran dengan 50%

CRMMA penurunannya adalah 22,2%. Penyusutan secara signifikan dipengaruhi oleh penggabungan agregat daur ulang, meskipun tingkat penyusutan bervariasi sesuai dengan sifat dan rasio penggabungan. Untuk rasio penggantian antara 50 dan 100%, perbedaan antara beton acuan (RC) dan campuran dengan CRCA tetap konstan, dalam kisaran kenaikan 30%.

I. Iskhakov, dkk (2021) penelitian ini menyelidiki perilaku tarik beton pada kondisi tegangan-regangan yang berbeda. Berdasarkan pengujian yang dilakukan, ada dua kelas ketegangan utama yaitu langsung dan tidak langsung. Pada tarik tidak langsung, tidak terdapat deformasi elastis plastis pada beton tarik, karena deformasi ini bersifat sekunder, yaitu muncul akibat deformasi tekan, gaya geser, belah, dll. Fitur utama yang mempengaruhi perilaku tarik beton adalah (1) modulus elastisitas beton untuk tekan dan tarik sama dengan $E_{ct} = E_c$, (2) koefisien poisson beton $\mu_{ct} = \mu_c = 0,2$, yaitu $\mu_{ct} = 0,2$, (3) diasumsikan dalam penelitian ini bahwa kekuatan tarik beton, f_{ct} , sama dengan kekuatan tarik beton rata-rata, F_{ctm} , sesuai dengan kode desain, (4) bentuk grafik untuk deformasi tarik beton, ϵ_{ct} , vs tegangan tarik beton, σ_{ct} , identik dengan kompresi, hanya nilai dalam grafik yang berbeda. Harus disebutkan bahwa rasio antara kekuatan tarik dan tekan beton menurun ketika kelas beton menjadi lebih tinggi. Selain itu, untuk beton mutu tinggi (HSC), mulai dari kelas C 70, kuat tarik beton tidak meningkat untuk kelas beton yang lebih tinggi. Oleh karena itu, pada elemen struktural beton, yang penampilan retaknya kritis, penggunaan HSC tidak efektif.

Feng Ming, dkk (2017) penelitian ini menyelidiki modulus elastisitas tekan dan tarik tanah beku. Dalam metode pembekuan tanah buatan yang dilakukan, digunakan suhu uji $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dalam penelitian ini, sensor perpindahan ditempatkan di bagian atas disk untuk merekam perpindahan titik secara vertikal, dua sensor perpindahan ditempatkan ditengah pada kedua sisi permukaan cakram sepanjang arah untuk merekam perpindahan secara horizontal titik C dan D, dan sensor gaya digunakan untuk merekam gaya yang diterapkan. Dari hasil percobaan yang dilakukan, pada awal pengujian, tegangan tarik kecil terjadi di dekat titik C dan titik D, karena sampel diperas. Tegangan tarik ini mengakibatkan rekahan mikro terutama pada daerah dekat garis CD. Akibatnya, perpindahan horizontal pada titik C atau D meningkat. Dengan meningkatnya gaya yang diterapkan, deformasi

lateral meningkat. Sedangkan untuk modulus elastisitas berdasarkan hasil perhitungan menunjukkan bahwa modulus elastisitas tekan semuanya lebih besar daripada modulus elastisitas tarik, jelas bahwa modulus elastisitas berubah dengan waktu yang telah berlalu, ketika sampel masih dalam fase deformasi elastis.