

**ANALISIS POLA KEGAGALAN BALOK *HYBRID*  
BETON BUSA RINGAN**

***FAILURE PATTERN ANALYSIS OF FOAM CONCRETE  
HYBRID BEAM***

**ZULKARNAEN  
D011 17 1025**



**PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
2022**

**LEMBAR PENGESAHAN (TUGAS AKHIR)**

**ANALISIS POLA KEGAGALAN BALOK HYBRID  
BETON BUSA RINGAN**

**Disusun dan diajukan oleh:**

**ZULKARNAEN**

**D011 17 1025**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 28 Januari 2022 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,

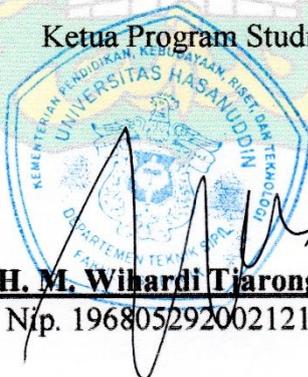


**Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT**  
NIP. 197206192000122001



**Dr. Eng. Fakhruddin, ST., M. Eng.**  
NIP. 198702282019031005

Ketua Program Studi,



**Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng**  
Nip. 196805292002121002

## PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini, nama Zulkarnaen, dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul "**Analisis Pola Kegagalan Balok Hybrid Beton Busa Ringan**", adalah karya ilmiah penulis sendiri, dan belum pernah digunakan untuk mendapatkan gelar apapun dan dimanapun.

Karya ilmiah ini sepenuhnya milik penulis dan 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.

Gowa, 28 Januari 2022

Yang membuat pernyataan,



Zulkarnaen

NIM: D011 17 1025

## KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur kita panjatkan kehadiran Allah Yang Maha Esa, atas berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “**Analisis Pola Kegagalan Balok Hybrid Beton Busa Ringan**” yang merupakan salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa banyak kendala yang dihadapi dalam penyusunan tugas akhir ini, namun berkat bantuan dari berbagai pihak, maka tugas akhir ini dapat terselesaikan. Oleh karena itu, dengan segala ketulusan, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. **Bapak Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, M.T.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
2. **Bapak Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge S.T., M.Eng.**, selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
3. **Ibu Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, S.T., M.T.**, selaku dosen pembimbing I yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.
4. **Bapak Dr. Eng. Fakhruddin, S.T., M.Eng.**, selaku dosen pembimbing II yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.
5. **Bapak Dr. Eng. Ir. Andi Arwin Amiruddin, S.T., M.T.**, selaku Kepala Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan izin atas segala fasilitas yang digunakan.
6. Seluruh dosen Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
7. Seluruh staf dan karyawan Departemen Teknik Sipil, staf dan karyawan Fakultas Teknik serta staf Laboratorium dan asisten Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua yang tercinta, yaitu ayahanda **Dalle, S.Pd., M.Si.** dan ibunda **Hj. Nurti, S.Pd.** atas doa, kasih sayang, dan segala dukungan

selama ini, baik spritiual maupun material, serta seluruh keluarga besar atas sumbangsih dan dorongan yang telah diberikan.

2. **Andrew, Dira, Dayat, Alief, Dede, Fathur, Richard, Kak Nandar, dan Kak Furqan** selaku partner dalam penelitian ini, yang selalu membantu dan memberikan semangat dalam penyelesaian tugas akhir ini.
3. Rekan-rekan di **Laboratorium Riset Rekayasa dan Perkuatan Struktur**, yang senantiasa membantu selama proses penelitian serta memberikan semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
4. Saudara-saudari **PLASTIS 2018**, teman-teman Departemen Teknik Sipil dan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin **Angkatan 2017** yang senantiasa memberikan warna yang begitu indah, dukungan yang tiada henti, semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
5. **Arung, Agung, Amin, Alief dan Dayat** Saudara Serumah **Markas Besar N6**, yang telah banyak memberikan dukungan serta senantiasa berbagi suka dan duka.
6. Teman-teman dekat yang senantiasa memberikan solusi pada setiap masalah yang penulis hadapai, baik dari segi penyelesaian tugas akhir ini maupun hal yang lain.
7. Saudari **Debby Febriyanti**, yang senantiasa memberikan semangat dan dukungan untuk penulis dalam berbagai hal.

Penulis menyadari bahwa setiap karya buatan manusia tidak akan pernah luput dari kekurangan, oleh karena itu penulis mengharapkan kepada pembaca kiranya dapat memberi sumbangan pemikiran demi kesempurnaan dan pembaharuan tugas akhir ini.

Akhirnya semoga Allah Yang Maha Esa melimpahkan berkat dan karunia-Nya kepada kita dan semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang Teknik Sipil.

Gowa, Januari 2022

Penulis

## ABSTRAK

Penggunaan beton sebagai bahan penyusun konstruksi menjadi unsur yang sangat dominan dipergunakan. Beton pada umumnya tersusun dari komposisi agregat kasar, agregat halus, semen, air, dan bahan tambahan lainnya. Mengingat sumber daya agregat kasar yang terbatas dan biasanya mempunyai berat jenis yang besar, maka perlu adanya alternatif agregat halus maupun kasar dari bahan lain untuk menggantikan agregat halus dan kasar alami yang mempunyai berat jenis yang relatif kecil. Penggunaan beton busa pada balok beton normal (balok hybrid) dapat menjadi solusi dalam mengurangi berat jenis dari suatu struktur. Selain itu penambahan serat *polyolefin macro-synthetic* juga dapat mengurangi laju perkembangan retak.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku lentur serta pola retak dan mode kegagalan balok hybrid beton busa ringan. Perilaku lentur didiskusikan berdasarkan perilaku beban-lendutan, beban-regangan beton, serta beban-regangan baja.

Tahapan penelitian terbagi atas dua yaitu pengujian sifat mekanis dan pengujian lentur balok beton bertulang. Pengujian sifat mekanis terdiri atas pengujian kuat tekan dengan menggunakan sampel silinder 100 mm x 200 mm dan pengujian kuat tarik belah dengan menggunakan sampel silinder 100 mm x 200 mm. Perawatan sampel menggunakan metode *curing* lembab dan diuji pada umur 28 hari. Kemudian untuk pengujian lentur balok beton bertulang menggunakan sampel balok 150 mm x 200 mm dengan panjang 3300 mm sebanyak 6 buah yang terdiri dari balok kontrol, balok dengan penambahan beton busa, serta balok dengan penambahan beton busa serta serat *polyolefin macro-synthetic* masing-masing sebanyak 2 buah.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan beton busa pada  $\frac{1}{2}$  tinggi balok hybrid (beton normal dan beton busa) dapat meningkatkan kapasitas lentur pada balok. Kemudian retak yang terjadi pada balok hybrid beton busa dengan penambahan serat *polyolefin macro-synthetic* lebih sedikit dibandingkan pada balok hybrid beton busa tanpa penambahan serat.

**Kata kunci:** balok hybrid, beton busa, serat *polyolefin macro-synthetic*

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	i
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH .....	ii
KATA PENGANTAR .....	iii
ABSTRAK.....	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
BAB 1. PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang .....	1
B. Rumusan Masalah .....	3
C. Tujuan Penelitian .....	4
D. Manfaat Penelitian.....	4
E. Batasan Masalah .....	4
F. Sistematika Penulisan .....	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA .....	7
A. Hasil Penelitian Sebelumnya.....	7
B. Beton Ringan .....	8
C. Foam Agent.....	10
D. Kuat Lentur pada Balok Beton Bertulang.....	14
D.1. Kuat Tekan Beton .....	19
D.2. Kuat Tarik Beton .....	21
D.3. Modulus Elastisitas .....	22
D.4. Kuat Tarik Baja.....	22
E. Retak pada Balok Beton Bertulang.....	23
E.1. Retak Lentur .....	23
E.2. Retak Miring.....	24
E.3. Retak Puntir .....	24
F. Keruntuhan Balok Beton Bertulang .....	25
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	26

A. Lokasi dan Waktu Penelitian .....	26
B. Jenis Penelitian dan Sumber Data .....	26
C. Tahapan Penelitian .....	26
D. Alat dan Bahan Penelitian .....	27
D.1. Pengujian Sifat Mekanis Tulangan .....	27
D.2. Pengujian Sifat Mekanis Beton.....	28
D.3. Pengujian Lentur Balok Beton Bertulang .....	30
E. Benda Uji .....	31
E.1. Pengujian Sifat Mekanis Beton.....	31
E.2. Pengujian Lentur Balok Beton Bertulang .....	32
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN .....	38
A. Pengujian Sifat Mekanis Tulangan .....	38
B. Pengujian Sifat Mekanis Beton.....	38
C. Pengujian Lentur Balok Beton Bertulang .....	43
C.1. Hubungan Beban-Lendutan .....	43
C.2. Hubungan Beban-Regangan Beton .....	45
C.3. Hubungan Beban-Regangan Baja.....	46
D. Pola Retak dan Mode Keruntuhan.....	47
D.1. Balok CB .....	48
D.2. Balok HB .....	51
D.3. Balok HB-F .....	56
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN .....	63
A. Kesimpulan .....	63
B. Saran .....	64
DAFTAR PUSTAKA.....	65

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Foam Agent yang Ideal .....	10
Gambar 2. Pola Pembebanan pada Pengujian Kuat Lentur .....	16
Gambar 3. Perilaku Lentur pada Balok .....	17
Gambar 4. Perilaku Lentur Mendekati Beban Ultimit.....	17
Gambar 5. Balok Tegangan Ekuivalen Whitney .....	19
Gambar 6. Hubungan Tegangan dan Regangan Tekan Beton .....	20
Gambar 7. Hubungan Tegangan dan Regangan Tarik Beton .....	21
Gambar 8. Faktor Reduksi Kekuatan .....	22
Gambar 9. Hubungan Tegangan dan Regangan Baja .....	23
Gambar 10. Retak pada Balok.....	24
Gambar 11. Ragam Keruntuhan Lentur .....	25
Gambar 12. Diagram Alir Penelitian.....	27
Gambar 13. <i>Universal Testing Machine</i> (UTM) .....	28
Gambar 14. Alat Pengujian Sifat Mekanis Beton .....	29
Gambar 15. Bahan Pengujian Sifat Mekanis Beton .....	30
Gambar 16. Alat Pengujian Lentur Balok .....	31
Gambar 17. Dimensi Benda Uji.....	31
Gambar 18. Benda Uji CB (Balok Normal) .....	33
Gambar 19. Benda Uji HB (Balok Hybrid) .....	33
Gambar 20. Pabrikasi Benda Uji Balok.....	34
Gambar 21. Proses Pengecoran Beton Busa .....	36
Gambar 22. <i>Set-up</i> Pengujian Lentur Balok.....	37
Gambar 23. Pengujian Sifat Mekanis Beton .....	39
Gambar 24. Nilai Kuat Tekan Beton .....	41
Gambar 25. Nilai Kuat Tarik Belah Beton .....	42
Gambar 26. Grafik Hubungan Beban-Lendutan.....	43
Gambar 27. Grafik Hubungan Beban-Regangan Beton .....	45
Gambar 28. Grafik Hubungan Beban-Regangan Baja .....	46
Gambar 29. Perkembangan Pola Retak Balok CB.....	48

Gambar 30. Pola Retak pada Fase Pembebanan 0-10 kN Balok CB.....	48
Gambar 31. Pola Retak pada Fase Pembebanan 10-20 kN Balok CB.....	49
Gambar 32. Pola Retak pada Fase Pembebanan 20-30 kN Balok CB.....	49
Gambar 33. Pola Retak pada saat Kondisi Hancur ( <i>failure</i> ) Balok CB .....	51
Gambar 34. Perkembangan Pola Retak Balok HB.....	52
Gambar 35. Pola Retak pada Fase Pembebanan 0-10 kN Balok HB.....	52
Gambar 36. Pola Retak pada Fase Pembebanan 10-20 kN Balok HB.....	54
Gambar 37. Pola Retak pada Fase Pembebanan 20-30 kN Balok HB.....	54
Gambar 38. Pola Retak pada saat Kondisi Hancur ( <i>failure</i> ) Balok HB .....	56
Gambar 39. Perkembangan Pola Retak Balok HB-F .....	57
Gambar 40. Pola Retak pada Fase Pembebanan 0-10 kN Balok HB-F ...	58
Gambar 41. Pola Retak pada Fase Pembebanan 10-20 kN Balok HB-F .	59
Gambar 42. Pola Retak pada Fase Pembebanan 20-30 kN Balok HB-F .	60
Gambar 43. Pola Retak pada saat Kondisi Hancur ( <i>failure</i> ) Balok HB-F ..	61
Gambar 44. Perbandingan Pola Retak pada Balok HB dengan HB-F .....	62

## DAFTAR TABEL

Tabel 1. Komposisi Bahan Campuran Beton Busa untuk 1 m <sup>3</sup> .....	32
Tabel 2. Komposisi Bahan Campuran Beton Normal untuk 1 m <sup>3</sup> .....	32
Tabel 3. Variasi Benda Uji Pengujian Balok Lentur .....	33
Tabel 4. Hasil Pengujian Tarik Baja Tulangan .....	38
Tabel 5. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton.....	40
Tabel 6. Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton.....	40
Tabel 7. Rekapitulasi Hasil Pengujian Balok.....	44
Tabel 8. Rekapitulasi Hasil Pengujian Beban-Regangan Beton.....	46
Tabel 9. Rekapitulasi Hasil Pengujian Beban-Regangan Baja .....	47

## **BAB 1. PENDAHULUAN**

### **A. Latar Belakang**

Dalam perkembangan dunia konstruksi di era sekarang, beton masih menjadi salah satu bahan yang paling sering digunakan di seluruh dunia. Penggunaan beton sebagai bahan penyusun konstruksi menjadi unsur yang sangat dominan dipergunakan dan dengan perkembangan melalui berbagai riset yang dilakukan guna memperoleh material beton yang memiliki ketahanan terhadap perubahan bentuk akibat beban yang bekerja.

Balok beton bertulang pada umumnya tersusun dari komposisi agregat kasar (kerikil atau split), agregat halus (pasir alam atau pasir buatan), semen, air, serta baja tulangan. Beton sangat kuat untuk menahan gaya tekan, namun lemah terhadap gaya tarik. Karena itu beton akan mengalami retak jika beban yang diberikan menimbulkan tegangan tarik yang melampaui kuat tarik beton tersebut. Fungsi utama dari beton adalah menahan beban atau gaya tekan dan menyelimuti tulangan beton agar tidak terganggu oleh lingkungan sekitarnya, sedangkan fungsi utama baja sebagai tulangan adalah menahan gaya tarik dan mencegah retak beton tidak melebar.

Mengingat sumber daya agregat kasar yang terbatas dan biasanya mempunyai berat jenis yang besar, maka perlu adanya alternatif agregat halus maupun kasar dari bahan lain untuk menggantikan agregat halus dan kasar alami yang mempunyai berat jenis yang relatif kecil. Disamping itu,

saat ini mulai banyak dikembangkan agregat - agregat buatan dari bahan non-alami dan limbah. Perkembangan industri yang sangat pesat ini menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan diantaranya semakin banyak limbah yang akan dihasilkan oleh industri. Untuk memperkecil dampak negatif dari banyaknya limbah yang dihasilkan terhadap lingkungan, maka diupayakan untuk memanfaatkan limbah sebagai material konstruksi sehingga bermanfaat bagi kehidupan, terutama dalam dunia teknik sipil.

Penggunaan material ringan sebagai bahan pembentuk struktur akan mengurangi berat total dari suatu bangunan. Seperti diketahui bahwa penggunaan bahan bangunan dengan massa rendah akan mengurangi berat struktur sehingga beban pondasi juga ikut berkurang. Sehingga banyak dikembangkan jenis beton dengan massa rendah yang kemudian dikenal dengan istilah beton ringan (*Lightweight Concrete*).

Beton ringan adalah beton yang mempunyai berat satuan tidak lebih dari  $1900 \text{ kg/m}^3$  (SNI 03-2847-2002). Pemakaian beton ringan pertama kali diperkenalkan di Amerika pada Perang Dunia I (1917) oleh perusahaan *Emergency Fleet Bulding* dengan memakai *aggregate expanded shale*, dan dipakai untuk konstruksi kapal serta perahu. Penggunaan beton ringan dalam berbagai konstruksi berkembang dengan cepat. Dalam pembuatan beton ringan salah satu bahan yang digunakan adalah *Concrete foam agent*.

Menurut Karthikeyan, B. etc, (2015), penggunaan beton busa (*foam agent*) merupakan ide kreatif karena sifatnya yang ringan, konstruksi pemasangannya cepat dan mudah, daya tahan tinggi, baik dalam penyerapan suara, tahan gempa dan sebagainya. Namun, secara umum ketika volume *foam agent* meningkat, kekuatan mekanis seperti kuat tekan dan kuat tarik belah menurun.

Penambahan beton busa pada balok beton normal yang dikenal dengan istilah *Hybrid Beam*, menjadi inovasi dalam beberapa penelitian. Penambahan beton busa ringan pada daerah tarik dapat mengurangi berat total dari komponen struktur. Selain itu, dengan penambahan beton busa ringan juga diharapkan dapat memberikan daya lekat antara beton dengan tulangan, sehingga meningkatkan kapasitas lentur dari balok tersebut.

Berdasarkan uraian di atas, maka penulis merasa perlu melakukan penelitian mengenai pola kegagalan balok *hybrid* yang menggunakan beton normal dan beton busa ringan pada daerah tarik dengan judul “**ANALISIS POLA KEGAGALAN BALOK *HYBRID* BETON BUSA RINGAN**”.

## **B. Rumusan Masalah**

Perumusan masalah dalam penelitian ini, dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Bagaimana kapasitas lentur balok *hybrid* beton normal dan beton busa ringan?

2. Bagaimana pola retak dan pola kegagalan pada balok *hybrid* beton normal dan beton busa ringan?

### **C. Tujuan Penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menganalisis kapasitas lentur balok *hybrid* beton normal dan beton busa ringan.
2. Menganalisis pola retak dan pola kegagalan pada balok *hybrid* beton normal dan beton busa ringan.

### **D. Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Dapat dijadikan sebagai acuan dalam pemberian informasi yang efektif, efisien dan berkelanjutan.
2. Dapat dijadikan sebagai bahan pertimbangan untuk penelitian-penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan permasalahan tersebut.

### **E. Batasan Masalah**

Batasan Masalah dalam penelitian ini, dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan terhadap benda uji balok *hybrid* beton normal dan beton busa ringan.

2. Beton busa pada balok beton bertulang sebagai bahan pengganti sebagian beton normal untuk mengurangi berat total balok.
3. Beton busa diproduksi dengan menggunakan semen Portland komposit (PCC) dari salah satu produsen semen PCC di Indonesia.
4. Pengujian sifat mekanis beton ringan terdiri atas pengujian kuat tekan dan pengujian kuat tarik belah.
5. Pengujian lentur balok beton bertulang *hybrid* dengan dua titik pembenanan secara monotonik menggunakan alat uji static berkapasitas 1500 kN.

#### **F. Sistematika Penulisan**

Adapun sistematika penulisan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

#### **BAB 1. PENDAHULUAN**

Pendahuluan memuat suatu gambaran secara singkat dan jelas tentang latar belakang mengapa penelitian ini perlu dilakukan. Dalam pendahuluan ini juga memuat rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan pada tugas akhir ini.

#### **BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA**

Pada bab ini diuraikan mengenai konsep teori yang relevan dan memberikan gambaran mengenai metode pemecahan masalah yang akan digunakan pada penelitian ini.

### BAB 3. METODE PENELITIAN

Bab ini menyajikan tempat dan waktu penelitian, alat dan bahan penelitian, benda uji, dan prosedur penelitian.

### BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dijabarkan mengenai hasil-hasil dan pembahasan yang didapatkan pada penelitian ini.

### BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini merupakan penutup dari keseluruhan penulisan tugas akhir yang berisi tentang kesimpulan yang disertai dengan saran-saran mengenai keseluruhan penelitian maupun untuk penelitian yang akan datang.

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Hasil Penelitian Sebelumnya

Yasser dkk (2015) menyajikan hasil studi tentang kapasitas lentur balok beton bertulang dengan atau tanpa *styrofoam* sebagai beton pengisi (SFC) pada daerah tarik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hubungan beban dan lendutan pada balok dengan SFC-30 menggunakan sistem rangka beton bertulang memiliki daktilitas yang lebih baik dari pada balok beton normal. Selain itu, kapasitas lentur balok beton komposit menunjukkan lendutan lebih besar dibandingkan beton normal.

Devid Falliano dkk (2018) menyajikan hasil eksperimental pada kekuatan tekan berbuis beton yang dipengaruhi kondisi pengawetan, jenis semen, bahan pembuis dan kepadatan kering. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *foaming agent* cukup banyak mempengaruhi sifat mekanik beton busa untuk rentang kepadatan rendah, tidak seperti yang mungkin terjadi untuk nilai kepadatan sedang hingga tinggi.

Aspek penting lainnya dari studi ini adalah pengaruh utama dari rasio air/semen, terutama untuk buih beton dengan bahan busa sintetis. Kombinasi dari bahan busa dengan rasio air/semen tertentu sangat penting. Memang, bahan berbuis sintetis mengarah ke lebih stabil spesimen beton busa daripada yang diperoleh dengan spesimen protein untuk rasio air/semen tetap sama dengan 0.3, yang mengarah ke kurang dari itu. Fase cairan dalam pasta yang mengandung semen. Perilaku ini sangat mempengaruhi perkembangan nilai kuat tekan. Untuk ini bahan pembuis,

meningkatkan rasio air/semen dari 0,3 menjadi 0,5 telah dilakukan untuk peningkatan yang luar biasa dari kekuatan sekitar 14 kali dalam kondisi pengeringan udara, lebih dari 14 kali dalam plastik kaca kondisi curing dan sekitar 12 kali dalam kondisi curing air.

## **B. Beton Ringan**

Beton normal merupakan bahan yang cukup berat, dengan berat sendiri mencapai  $2400 \text{ kg/m}^3$ . Untuk mengurangi beban mati pada suatu struktur beton maka telah banyak dipakai jenis beton ringan. Menurut Standar Nasional Indonesia 03-2847 tahun 2002, beton dapat digolongkan sebagai beton ringan jika beratnya kurang dari  $1900 \text{ kg/m}^3$ . Dalam membuat beton ringan tentunya dibutuhkan material yang memiliki berat jenis yang ringan pula.

Pada umumnya berat jenis yang lebih ringan dapat dicapai jika berat beton diperkecil yang berpengaruh pada menurunnya kekuatan beton tersebut. Pembuatan beton ringan pada prinsipnya adalah membuat rongga di dalam beton. Semakin banyak rongga udara dalam beton semakin ringan beton yang dihasilkan. Ada 3 macam cara membuat rongga udara dalam beton, yaitu:

1. Yang paling sederhana yaitu dengan memberikan agregat ringan. Agregat itu bisa berupa batu apung, styrofoam, batu alwa, atau abu terbang (*fly ash*) yang dijadikan batu.
2. Menghilangkan agregat halus (agregat halus disaring, contohnya debu/abu terbangnya dibersihkan).

3. Meniupkan atau mengisi udara di dalam beton. Cara ketiga ini terbagi lagi menjadi secara mekanis dan secara kimiawi. Bahan campuran antara lain pasir kwarsa, semen, kapur, sedikit gypsum, air, dan dicampur aluminium pasta sebagai bahan pengembang secara kimiawi.

Secara umum kandungan udara mempengaruhi kekuatan beton. Kekuatan beton berkurang 5.5% dari kuat tekan setiap pemasukan udara 1% dari volume campuran. Beton dengan bahan pengisi udara mempunyai kekuatan 10% lebih kecil dibandingkan beton tanpa pemasukan udara pada kadar semen dan workabilitas yang sama (Murdock & Book, 1999). Pada beton dengan kekuatan menengah dan tinggi, tiap 1% peningkatan kandungan udara akan mengurangi kekuatan tekan beton sekitar 5% tanpa perubahan air semen (Mehta, 1986). Dalam hal ini material tambah yang digunakan adalah *foam concrete*.

Namsone, E. etc, (2017) menyatakan bahwa daya tahan *foam concrete* dianggap sebagai masalah penting terutama pada kondisi iklim basah dan dingin. Komponen utama daya tahan adalah kekuatan mekanik, daya serap air dan ketahanan terhadap beku. Penyusutan (termasuk penyusutan karbonasi) juga harus dipertimbangkan. Densitas rendah dan porositas tinggi dari material mempercepat proses karbonasi. Penyusutan kemungkinan disebabkan karbonasi, juga meningkatkan resiko retak dan hilangnya ketahanan.

### C. Foam Agent

*Foam agent* merupakan larutan pekat dari bahan surfaktan yang apabila akan digunakan harus dilarutkan dengan air. Surfaktan adalah zat yang cenderung terkonsentrasi antara muka dan mengaktifkan antara, Murtono, A (2015). *Additive foam agent* merupakan cairan bahan baku pembuat busa yang berkualitas tinggi untuk campuran bata ringan. Untuk mempercepat pengeringan dan pengerasan secara sempurna di tambahkan 2 % - 3 % untuk menghasilkan bata ringan. Adapun cara penggunaan 1 liter ADT (*additive*) *foam agent* dicampur dengan air bersih 40 – 80 liter (normal 60 liter).

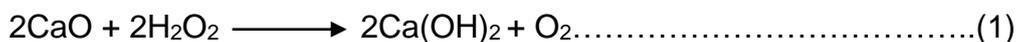


Gambar 1. Foam Agent yang Ideal

Karimah. R, dkk (2017) menjelaskan pengertian foam agent surfaktan sintetis yang dapat diklasifikasikan menurut sifat kelompok hidrofilik, yaitu bagian molekul yang larut dalam air sebagai berikut:

1. Anionik, sekitar 70 % dari surfaktan yang digunakan untuk menghasilkan busa, yaitu bagian aktif dari molekul yang bermuatan negatif.
2. Kationik, kurang dari 5 % dari surfaktan yang digunakan untuk menghasilkan busa, yaitu hidrofilik yang bermuatan positif.
3. Non-ionik (polar), sekitar 25 % dari surfaktan yang digunakan untuk memproduksi busa, yaitu netral. Kurangnya muatan listrik dapat memberikan stabilitas yang lebih besar untuk campuran beton busa.
4. Amfoter dan Zwitterion surfaktan jarang digunakan untuk memproduksi beton busa, tergantung pada pH larutan molekul dapat mempertahankan muatan positif atau muatan negatif, atau keduanya.

*Foaming agent* merupakan salah satu bahan pembuat busa yang biasanya berasal dari bahan berbasis protein *hydrolyzed* atau resin sabun. Foam agent yang digunakan dalam campuran beton ringan adalah umumnya berasal dari larutan Hydrogen Peroksida ( $H_2O_2$ ). Larutan  $H_2O_2$  bereaksi dengan CaO yang terdapat dari semen akan menghasilkan gas. Jika digunakan Hidrogen Peroksida ( $H_2O_2$ ) gas yang dihasilkan adalah Oksigen ( $O_2$ ). Reaksi kimia yang terjadi:



*Foaming agent* adalah suatu larutan pekat dari bahan surfaktan, dimana apabila hendak digunakan harus dilarutkan dengan air. Salah satu bahan yang mengandung surfaktan adalah Detergent ( $C_{12}H_{25}SO_4Na$ ) *Foaming agent* saat dicampurkan dengan kalsium hidroksida yang terdapat

pada pasir dan air akan bereaksi sehingga membentuk hidrogen. Gas hidrogen ini membentuk gelembung-gelembung udara di dalam campuran beton tadi. Gelembung-gelembung udara ini menjadikan volumenya menjadi dua kali lebih besar dari volume semula. Di akhir proses pembusaan, hidrogen akan terlepas ke atmosfer dan langsung digantikan oleh udara.

Rongga-rongga tersebut yang membuat bata beton menjadi ringan (Simbolon, 2014). Ada dua tipe foam agent :

1. Sintetik yaitu yang memiliki kepadatan 40 gr/liter. Bahan dasar foam agent tipe ini berasal dari bahan kimia buatan murni. Tipe ini digunakan untuk mendapatkan densitas lebih dari  $1000 \text{ kg/m}^3$ . Gelembung yang dihasilkan oleh foam agent sintetik ini lebih halus dibandingkan dengan *foam agent* tipe protein.
2. Protein yaitu yang memiliki kepadatan 80 g/liter. Bahan dasar *foam agent* tipe protein berasal dari protein hewan seperti tanduk, tulang, dll. tipe ini digunakan untuk mendapatkan densitas antara  $400 \text{ kg/m}^3$  sampai dengan  $1600 \text{ kg/m}^3$ .

Metode pengadukan *foam agent* bisa dilakukan dengan mesin generator busa dan metode adukan manual. Karena keterbatasan alat, pada penelitian ini digunakan dengan cara adukan manual menggunakan propeler yang dipasangkan pada bor tangan.

Kuzielova E. dkk (2016) dalam penelitiannya menerangkan tentang efek foam agent terhadap sifat beton busa. Dengan menggunakan

generator, busa beton dibentuk dari campuran protein busa, air dan udara. Benda uji dibuat dengan variasi rasio volume busa terhadap volume beton, sehingga menghasilkan kepadatan dan berat yang berbeda-beda. Setelah semua benda uji tersedia tahap selanjutnya adalah menganalisis sifat beton busa dengan menggunakan metode *X-Ray Diffraction (XRD)* dan *Scanning Electron Microscopy (SEM)* serta menganalisis kepadatan benda uji melalui pengujian kuat tekan. Hasil uji XRD menunjukkan Kristal kalsium karbonat membangun struktur pori dari pasta semen yang mengarah pada penurunan porositas dan distribusi ukuran pori bergeser ke pori-pori yang lebih kecil. Sedangkan dari uji SEM memperlihatkan bahwa meningkatnya jumlah volume busa membuat ukuran pori semakin membesar. Dari uji kuat tekan didapatkan kuat tekan tertinggi benda uji adalah 2,6 MPa dengan tingkat kepadatan terendah sedangkan kuat tekan terendah didapatkan sebesar 1,8 MPa dengan jumlah busa yang paling banyak.

Air diperlukan untuk pembuatan beton dan mortar agar terjadi proses kimiawi dengan semen untuk membasahi agregat dan untuk melumas campuran agar mudah saat proses pengerjaan atau biasa dikenal dengan *workability*. Selain itu, air merupakan bahan utama selain dari agregat yang digunakan untuk membuat beton dan mortar. Pada umumnya air minum dapat dipakai untuk campuran beton maupun mortar. Air yang mengandung senyawa-senyawa yang berbahaya, yang tercemar garam, minyak, gula, atau bahan-bahan kimia lain, bila dipakai untuk campuran beton akan sangat menurunkan kekuatannya dan juga dapat mengubah sifat-sifat dari

semen. Selain itu, air yang demikian dapat mengurangi afinitas antara agregat dengan pasta semen dan mungkin pula mempengaruhi kemudahan pada saat proses pengerjaan yang dilakukan. Hal ini disebabkan karena karakteristik pasta semen merupakan hasil reaksi kimiawi antara semen dengan air, maka bukan perbandingan jumlah air terhadap total (semen + agregat halus + agregat kasar) material yang menentukan, melainkan hanya perbandingan antara air dan semen atau biasa dikenal dengan faktor air semen (FAS) pada campuran yang menentukan. Air yang berlebihan akan menyebabkan banyaknya gelembung air setelah proses hidrasi selesai, sedangkan air yang terlalu sedikit akan menyebabkan proses hidrasi tidak seluruhnya selesai. Sebagai akibatnya beton yang dihasilkan akan kurang kekuatannya (Nawy, 1998).

#### **D. Kuat Lentur pada Balok Beton Bertulang**

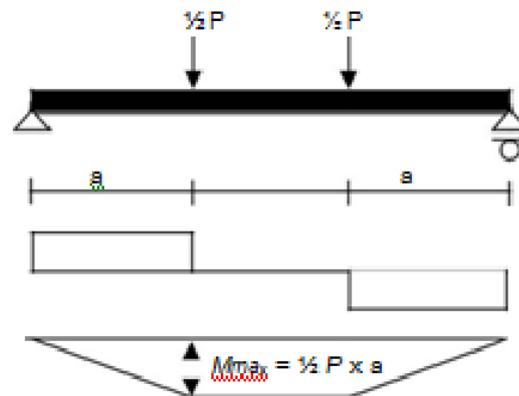
Beton merupakan salah satu material konstruksi yang sangat banyak digunakan pada berbagai struktur bangunan sipil yang mempunyai perilaku yang spesifik yaitu mempunyai kuat tekan yang besar dan kuat tarik yang sangat kecil. Olehnya itu material beton umumnya digabungkan dengan material lain yang mempunyai kuat tarik yang besar, seperti baja. Sehingga merupakan kesatuan struktur yang komposit yaitu yang disebut dengan beton bertulang. Tulangan baja tersebut perlu untuk beban-beban berat dalam hal ini untuk mengurangi lendutan jangka panjang (Nawy, 1998).

Beton bertulang adalah beton yang ditulangi dengan luas dan jumlah tulangan yang tidak kurang dari nilai minimum yang disyaratkan dengan

atau tanpa prategang, dan dapat direncanakan berdasarkan asumsi bahwa kedua bahan tersebut bekerja sama dalam memikul gaya-gaya (SNI 03-2847–2013). Baja tulangan memiliki sifat kuat terhadap gaya tarik, sedangkan beton memiliki sifat kuat terhadap gaya tekan, namun lemah terhadap tarik. Berdasarkan kelebihan dan kekurangan kedua material tersebut, maka lahirlah beton bertulang menjadi satu kesatuan yang komposit dalam menerima beban tekan maupun beban tarik.

Beton bertulang mempunyai sifat yang sangat sesuai dengan sifat bahan penyusunnya, yaitu sangat kuat terhadap beban tarik maupun beban tekan yang diberikan. Beban tarik pada beton bertulang dapat ditahan oleh baja tulangan, sedangkan beban tekan cukup ditahan oleh beton itu sendiri. Beton juga dapat melindungi baja dari kebakaran dan karat atau korosi yang terjadi dengan tujuan beton agar tetap awet.

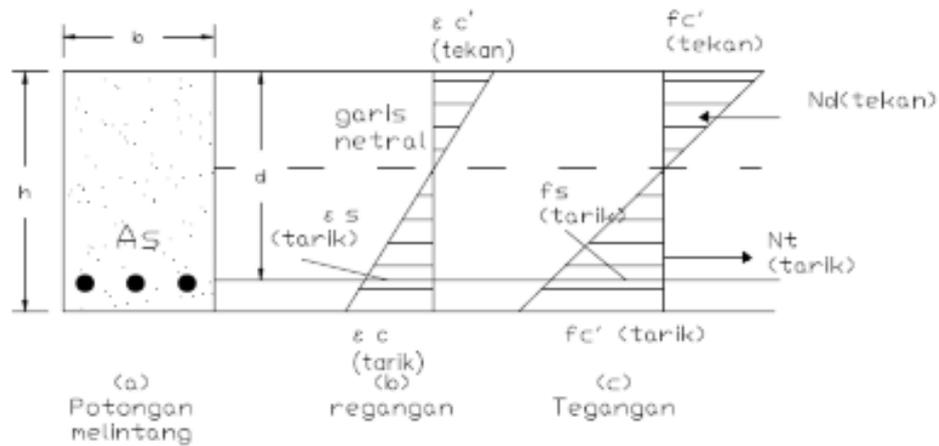
Lenturan murni adalah lenturan yang terjadi pada balok dengan mengondisikan gaya lintangnya sama dengan nol, yaitu dengan meletakkan balok beton pada tumpuan sederhana yang dibebani secara simetris sejauh  $a$  dari tumpuan seperti yang terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Pola Pembebanan pada Pengujian Kuat Lentur

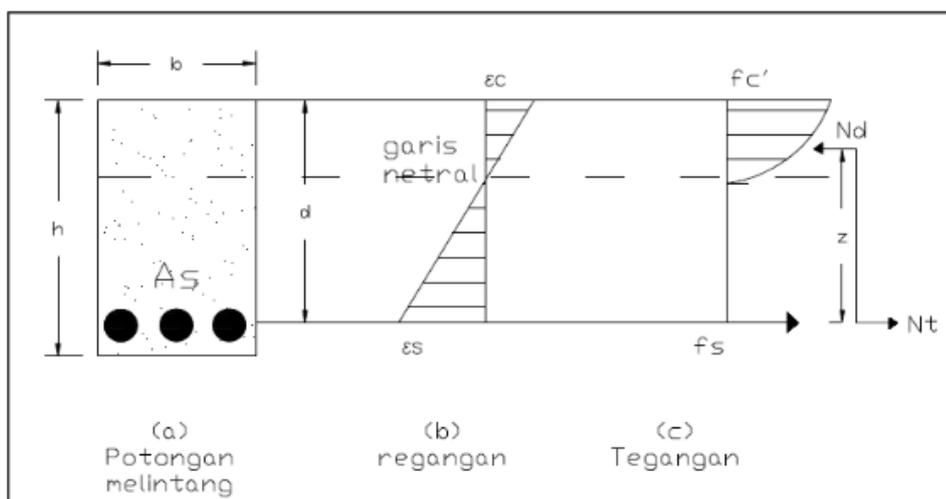
Ketika suatu gelagar balok diberi beban sehingga menimbulkan momen lentur, maka akan terjadi deformasi lentur dalam balok tersebut. Pada kejadian momen lentur positif, maka bagian atas akan mengalami regangan tekan dan bagian bawah mengalami regangan tarik. Regangan-regangan tersebut akan menimbulkan tegangan-tegangan yang harus dipikul oleh balok, dimana tegangan tekan akan terjadi dibagian atas dan tegangan tarik di bagian bawah.

Pada saat beban kecil, belum terjadi retak pada beton, dalam kondisi ini beton dan baja tulangan bersama-sama akan menahan tegangan yang terjadi. Distribusi tegangan akan tampak linear, bernilai nol pada garis netral dan sebanding dengan regangan yang terjadi. Gambar 3 memperlihatkan perilaku lentur pada beton.



Gambar 3. Perilaku Lentur pada Balok

Ketika beban diperbesar lagi, nilai regangan dan tegangan tekan akan semakin meningkat, dan cenderung untuk tidak sebanding lagi, dimana tegangan beton akan membentuk kurva non linear. Bentuk tegangan beton tekan pada penampangnya akan berupa garis lengkung dimulai dari garis netral sampai ke serat atas balok, seperti yang terlihat pada Gambar 4.

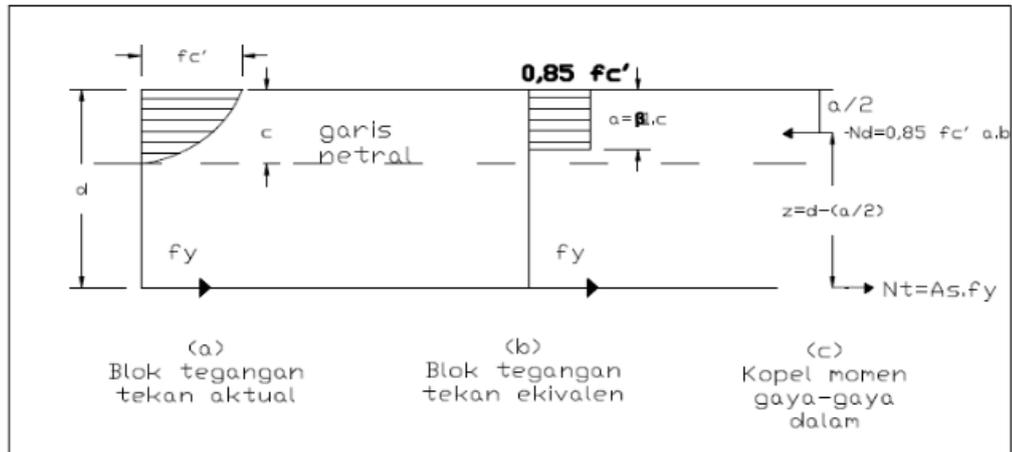


Gambar 4. Perilaku Lentur Mendekati Beban Ultimit

$N_d$  adalah resultan gaya tekan dalam sedangkan  $N_t$  adalah resultan gaya tarik dalam. Kedua gaya ini memiliki garis kerja sejajar, sama besar, tetapi berlawanan arah dan dipisahkan dengan jarak  $z$  sehingga membentuk kopel momen tahanan dalam, dimana nilai maksimumnya disebut kuat lentur atau momen tahanan penampang komponen struktur terlentur.

Untuk merencanakan balok pada kondisi pembebanan tertentu maka harus diketahui komposisi dimensi balok beton seperti lebar balok ( $b$ ), tinggi balok ( $h$ ), dan jumlah serta luas tulangan baja ( $A_s$ ),  $f'_c$  dan  $f_y$  sehingga dapat menimbulkan momen tahanan dalam sama dengan momen lentur maksimum yang ditimbulkan oleh beban.

Namun menentukan momen tahanan dalam bukanlah hal yang mudah karena hubungan dengan bentuk diagram tegangan tekan diatas garis netral dapat berbentuk garis lengkung. Untuk mempermudah perhitungan, maka Whitney telah mengusulkan bentuk persegi panjang sebagai distribusi tegangan beton tekan ekuivalen dan juga telah diatur dalam Standar Nasional Indonesia (SNI) 2847-2013 pada pasal 10.2.7.1. Kuat lentur nominal untuk balok penampang persegi dapat diturunkan dengan menggunakan tegangan persegi ekuivalen. Gambar 5 memperlihatkan balok tegangan ekuivalen Whitney.

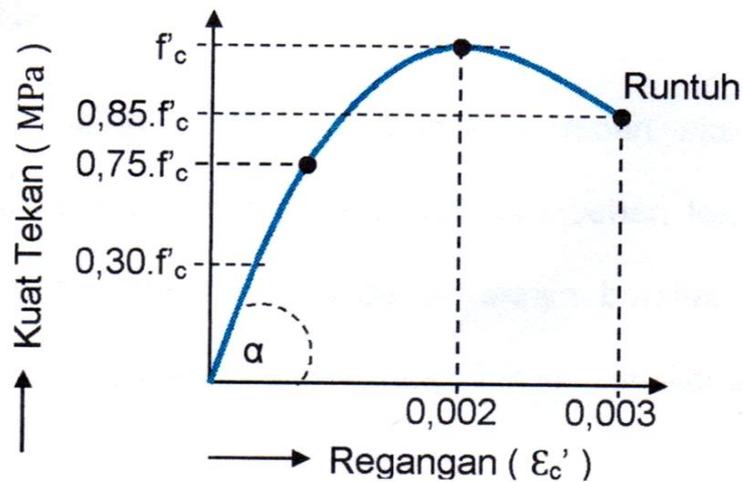


Gambar 5. Balok Tegangan Ekuivalen Whitney

### D.1. Kuat Tekan Beton

Kuat tekan merupakan sifat utama dari beton. Karena sifat utama beton adalah sangat kuat jika menerima beban tekan, maka mutu beton pada umumnya hanya ditinjau terhadap kuat tekan beton tersebut. Sifat yang lain (misal: kuat tarik, dan modulus elastisitas beton) dapat dikorelasikan terhadap kuat tekan beton. Menurut SNI 2847-2013, pasal 5.3.3.2, kuat tekan beton  $f'_c$  yaitu kuat tekan selinder beton yang diisyaratkan pada umur 28 hari.

Adapun hubungan tegangan dan regangan tekan beton yang diperoleh dari hasil penelitian melalui pengujian spesimen beton selinder yang diberi beban tekan uniaksial hingga beton hancur, seperti terlihat pada Gambar 6.



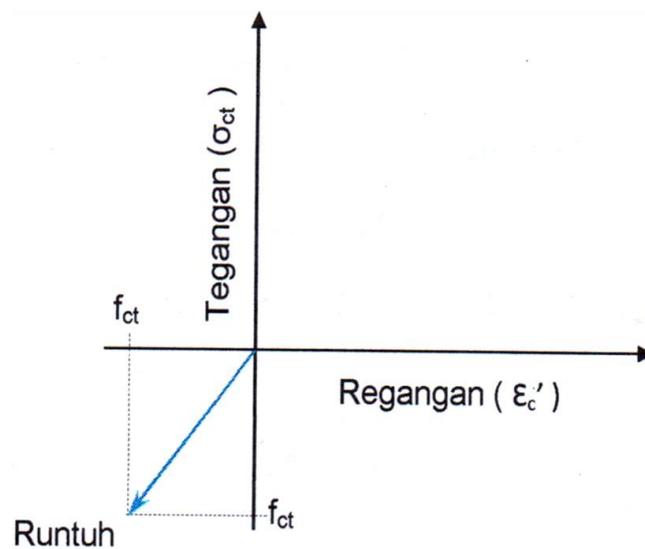
Gambar 6. Hubungan Tegangan dan Regangan Tekan Beton

Pada Gambar 6 tampak perilaku tegangan-regangan beton sebagai berikut:

1. Pada saat beban tekan mencapai  $0,3f_c - 0,4f_c$ , perilaku tegangan dan regangan pada dasarnya masih bersifat linear.
2. Saat beban tekan melebihi  $0,3f_c - 0,4f_c$ , retak-retak lekatan mulai terbentuk, perilaku linear berubah menjadi nonlinear.
3. Tegangan maksimum terjadi saat beban tekan mencapai regangan 0.002 yaitu sekitar  $0,7f_c - 0,9f_c$  dan retak-retak lekatan tersebut mulai merambat sehingga terbentuk pola retak yang kontinu. Pada kondisi ini hubungan tegangan dan regangan beton semakin menyimpang dari kondisi linear.
4. Pada saat beton akan runtuh dimana kuat tekan beton telah mencapai puncak, maka tegangan beton turun menjadi  $0,85f_c$  sedangkan regangan tekan tetap naik sampai mencapai batas retak yaitu  $\epsilon_{cu} = 0.003$ , sesuai peraturan SNI 2847-2013 pasal 10.2.3.

## D.2. Kuat Tarik Beton

Perilaku beton pada saat diberikan beban aksial tarik agak berbeda dengan perilaku beton saat diberikan beban tekan. Hubungan tegangan regangan tarik beton pada umumnya bersifat linear sampai terjadinya retak yang besarnya langsung diikuti oleh keruntuhan beton. Seperti pada Gambar 7.



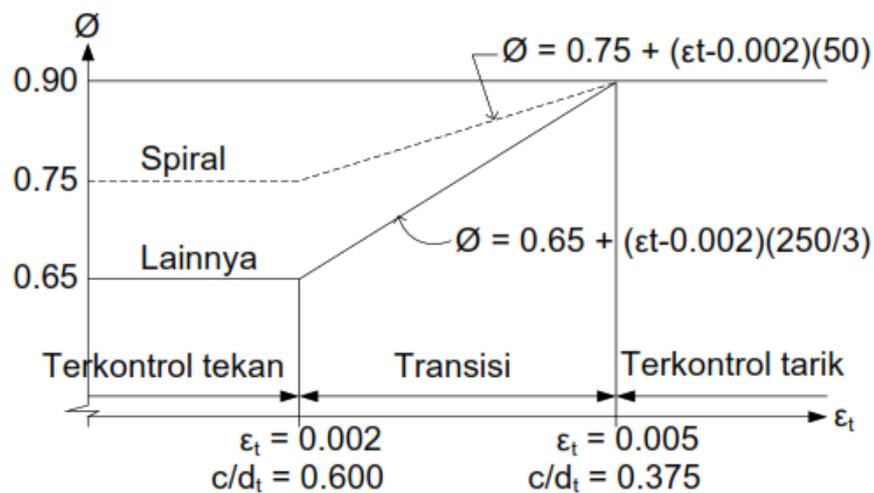
Gambar 7. Hubungan Tegangan dan Regangan Tarik Beton

Kekuatan tarik beton lebih sulit diukur dibanding kuat tekannya karena masalah penjepitan (*gripping*) pada mesin. Ada sejumlah metode yang tersedia untuk menguji kekuatan tarik dan yang paling sering digunakan adalah tes pembelahan selinder. Selain itu juga digunakan *rupture fr* (Nawy. 1998).

Kuat tarik beton  $f_{ct}$  jauh lebih kecil dari pada kuat tekannya, yaitu berkisar  $f_{ct} = 8\%.f_c$  sampai dengan  $15\%.f_c$ .

### D.3. Modulus Elastisitas

Berdasarkan SNI 2847.2013 pasal 9, modulus elastisitas  $E_c$ , untuk beton normal diizinkan diambil sebesar  $4700\sqrt{f'_c}$  sedangkan untuk tulangan nonprategang modulus elastisitas  $E_s$ , untuk diizinkan untuk diambil sebesar 200.000 MPa. Faktor reduksi kekuatan tulangan baja dapat dilihat pada Gambar 8.



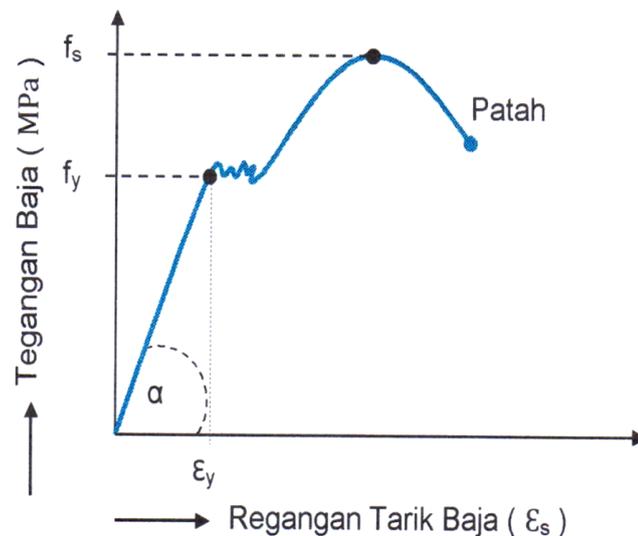
Gambar 8. Faktor Reduksi Kekuatan

### D.4. Kuat Tarik Baja

Meskipun tulangan baja juga mempunyai sifat tahan terhadap beban tekan, tetapi karena harganya cukup mahal, maka tulangan baja ini hanya diutamakan untuk menahan beban tarik pada struktur beton bertulang, sedangkan beban tekan yang bekerja cukup ditahan oleh beton.

Menurut SNI 2847-2103, pasal 8.5.2, modulus elastisitas tulangan baja non-pratekan  $E_s$  dapat diambil sebesar 200000 Mpa,  $f_y$  merupakan tegangan leleh tulangan baja dengan  $\epsilon_y$  adalah regangan leleh tulangan

baja. Jika tegangan baja  $f_s < f_y$ , maka  $f_s = E_s \cdot \epsilon_s$ , namun jika tegangan baja tulangan  $\epsilon_s > f_y/E_s$ , maka  $f_s = f_y$ . Hubungan antara tegangan dan regangan tarik tulangan baja dilukiskan pada Gambar 9.



Gambar 9. Hubungan Tegangan dan Regangan Baja

## E. Retak pada Balok Beton Bertulang

### E.1. Retak Lentur

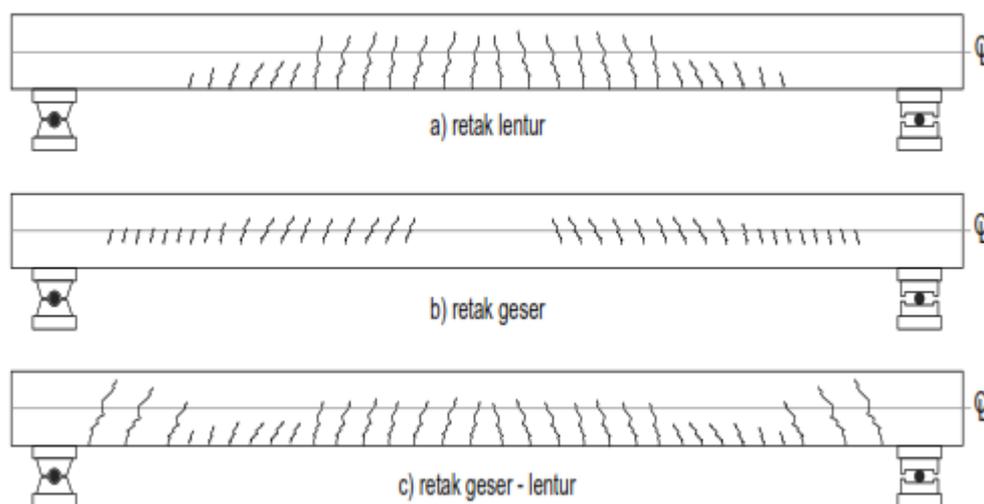
Retak lentur adalah retak vertikal yang memanjang dari sisi tarik balok dan mengarah ke atas sampai daerah sumbu netralnya serta terjadi pada daerah momen lentur yang besar. Jika balok memiliki web yang sangat tinggi, jarak retak akan sangat dekat, dengan sebagian retak terjadi bersamaan sampai di atas tulangan, dan Sebagian lagi tidak sampai ke tulangan. Retak ini akan lebih lebar di pertengahan balok dari pada bagian dasarnya. Pada penelitian ini, jenis retak inilah yang akan diidentifikasi.

## E.2. Retak Miring

Retak miring dapat disebabkan karena gaya geser yang dapat terjadi pada bagian web balok beton bertulang baik sebagai retak bebas atau perpanjangan dari retak lentur. Retak geser web kadang-kadang dapat terjadi pada web-web penampang prategang, terutama dapat terjadi pada penampang dengan flens yang besar dan web yang tipis. Jenis retak geser miring yang paling umum ditemukan adalah retak geser lentur yang terjadi pada balok prategang dan non prategang.

## E.3. Retak Puntir

Retak puntir cukup mirip dengan retak geser, namun retak ini melingkar di sekeliling balok. Jika sebuah batang beton tanpa tulangan menerima torsi secara murni maka batang tersebut akan retak dan runtuh di sepanjang garis spiral dengan sudut sebesar  $45^\circ$  karena adanya gaya tarik diagonal yang disebabkan oleh tegangan puntir.

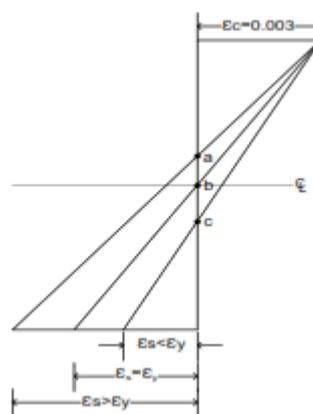


Gambar 10. Retak pada Balok

## F. Keruntuhan Balok Beton Bertulang

Berdasarkan jenis keruntuhan balok beton bertulang yang sering dialami diperlihatkan pada Gambar 10, dengan penjelasan jenis-jenis keruntuhan balok beton bertulang yang dialami adalah sebagai berikut:

1. Penampang balanced. Tulangan tarik mulai leleh tepat pada saat beton mencapai regangan batasnya dan akan hancur karena tekan  $\epsilon_c = 0,003$  dan  $\epsilon_s = \epsilon_y = f_y/E_s$ .
2. Penampang over-reinforced. Kondisi ini terjadi apabila tulangan yang digunakan lebih banyak dari yang diperlukan dalam keadaan balanced. Keruntuhan ditandai dengan hancurnya beton yang tertekan. Pada awal keruntuhan,  $\epsilon_s < \epsilon_y$  dan  $f_s < f_y$ .
3. Penampang under-reinforced. Kondisi ini terjadi apabila tulangan tarik yang dipakai pada balok kurang dari yang diperlukan untuk kondisi balanced. Keruntuhan ditandai dengan lelehnya tulangan baja. Regangan baja melebihi regangan lelehnya,  $\epsilon_s > \epsilon_y$ .



Gambar 11. Ragam Keruntuhan Lentur