TUGAS AKHIR

KUAT LENTUR DAN POLA RETAK BALOK *HYBRID* BETON BERTULANG DENGAN MATERIAL LIMBAH PLASTIK PET

FLEXURAL STRENGTH AND CRACK PATTERN OF REINFORCED CONCRETE HYBRID BEAMS WITH PET PLASTIC WASTE MATERIALS

ANDI ERLI MAULINA
D111 16 032

PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
2020

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS HASANUDDIN
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
Jl. Poros Malino km. 6 Bontomarannu, 92172, Kab. Gowa, Sulawesi Selatan
http://civil.unhas.ac.id civil@eng.unhas.ac.id

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat dalam menyelesaikan studi pada Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Makassar.

Judul Tugas Akhir

KUAT LENTUR DAN POLA RETAK BALOK HYBRID BETON BERTULANG DENGAN MATERIAL LIMBAH PLASTIK PET

Disusun oleh

ANDI ERLI MAULINA
D111 16 032

Telah diperiksa dan disetujui oleh dosen pembimbing

Pembimbing I	Pembimbing II
Dr.Eng. Hj. Rita Irmawaty, ST, MT	Ir. H. Achmad Bakri Muhiddin, MSc, Ph.D
NIP: 197206192000122001	NIP: 196007301986031003

Mengetahui,
Ketua Departemen Teknik Sipil

Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, MEng
NIP: 196805292001121002

versi 2.0

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini, nama Andi Erli Maulina, dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul "**Kuat Lentur dan Pola Retak Balok *Hybrid* Beton Bertulang dengan Material Limbah Plastik PET**", 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, 22 April 2020
Yang membuat pernyataan,

Andi Erli Maulina
NIM: D111 16 032

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kita panjatkan kehadirat Allah SWT, atas berkat rahmat dan petunjuk-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul "**Kuat Lentur dan Pola Retak Balok *Hybrid* Beton Bertulang Dengan Material Limbah Plastik PET**", sebagai salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada fakultas Teknik Departemen Sipil Univeristas Hasanuddin. Tugas akhir ini disusun berdasarkan hasil penelitian di Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari bahwa penyusunan Tugas Akhir ini tidak lepas dari bimbingan, petunjuk dan perhatian dari berbagai pihak sehingga dapat terselesaikan. Oleh karena itu, pada kesempatan kali ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

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

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua yang tercinta dan terkasih**,** yaitu ayahanda **Abd. Wahab** dan ibunda **Andi Ena** atas do'a, kasih sayangnya, pengorbanan dan segala dukungan selama ini, baik spritiual maupun material.
2. Saudara tercinta, kakanda **Irda** serta adinda **Nurul** yang senantiasa memberikan dorongan dan menghibur penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
3. **Kak Delifa Angriani A** dan **Zulfadli**, selaku partner dalam penelitian ini, yang senantiasa membantu, *supporting*, dan memberikan masukan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
4. Rekan-rekan di **Laboratorium Riset Rekayasa Perkuatan Struktur** (Teguh, Anse, Uqbah, Indra) yang senantiasa membantu, memberi semangat dan teman diskusi dalam penyelesaian tugas akhir ini.
5. **Rekan-rekan, Kakanda serta Adinda se-Asisten Laboratorium Struktur dan Bahan** (Kak Fahri, Kak Hasbi, Mus, Rifqi, Jijim, Dira dan Masnia) yang senantiasa memberikan warna yang begitu indah, dukungan yang tiada henti, semangat serta dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
6. **Ima, Devi, Geby, Uli, Diwul, Sita, Ara, Mei, Kintan** yang senantiasa memberikan energi positif dalam penyelesaian tugas akhir ini.
7. **Saudara se-PATRON 2017**, yang senantiasa memberikan warna yang sangat begitu indah, dukungan yang tiada henti, semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.

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

Akhirnya semoga Allah SWT melimpahkan rahmat dan karunia-Nya kepada kita dan semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang Teknik Sipil.

Gowa, 15 April 2020

Penulis

ABSTRAK

Gaya tekan dan gaya tarik pada beton bertulang bekerja secara bersamaan pada daerah yang berbeda. Ketika beton sudah tidak mampu menahan gaya tarik maka tulangan baja yang akan menahannya. Keberadaan beton di sisi tarik harusnya dapat diminimalisir dari segi mutu dan penggunaan material agar lebih ekonomis. Salah satunya dengan memanfaatkan limbah plastik PET.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisa kapasitas lentur dan pola retak balok *hybrid* beton bertulang yang menggunakan material limbah plastik PET.

Metode yang digunakan adalah studi eksperimental dengan variasi benda uji balok normal sebagai balok kontrol, dan balok *hybrid*. Pengecoran balok *hybrid* dilakukan 2 tahap dengan perbedaan waktu 1 hari antara pengecoran beton normal dan beton PET. Pengujian kapasitas lentur menggunakan dua titik pembebanan di tengah bentang balok.

Hasil menunjukkan bahwa balok *hybrid* dengan penambahan plastik PET pada daerah tarik mampu berperilaku sama seperti balok normal dibuktikan dengan kemampuan menahan beban yang hampir sama dan pola retak yang tidak mengalami *delay* dan *longitudinal shear* di area sambungan dari dua jenis beton.

Kata Kunci: Balok *Hybrid*, Kuat Lentur, Plastik PET.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL
LEMBAR PENGESAHAN i
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH ii
KATA PENGANTAR iii
ABSTRAK v
DAFTAR ISI vi
DAFTAR GAMBAR ix
DAFTAR TABEL xi
BAB 1. PENDAHULUAN 1
A. Latar Belakang 1
B. Rumusan Masalah 3
C. Tujuan Penelitian 3
D. Manfaat Penelitian 3
E. Batasan Masalah 4
F. Sistematika Penulisan 4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA 6
A. Penelitian Sebelumnya 6
B. Beton Bertulang 7
C. Kapasitas Lentur 9
D. Pola Retak 10
E. Keruntuhan Balok 13
F. Plastik 14
F.1. PET (*Polyethylene Teraphthalate*) atau Kode 1 15
F.2. HDPE (*High-Density Polyethylene*) atau Kode 2 15
F.3. PVC (*Polyvinyl Chloride*) atau Kode 3 16
F.4. LDPE (*Low-Density Polyethylene*) atau Kode 4 16
F.5. PP (*Polypropylene*) atau Kode 5 16
F.6. PS (*Polystyrene*) atau Kode 6 17
F.7. Bahan Plastik Lain atau Kode 7 17

G. Serat Baja 17
H. Bahan Tambah..... 18
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN..... 20
A. Rancangan Penelitian 20
B. Uji Properties..... 22
B.1. Uji Tarik Baja Tulangan..... 22
B.2. Uji Tekan Beton 22
C. Lokasi dan Waktu Penelitian 22
D. Alat dan Bahan Penelitian..... 23
D.1. Alat Uji Pembebanan 23
D.2. Alat Ukur Lendutan 25
D.3. Alat Ukur Regangan..... 25
E. Benda Uji 27
F. Prosedur Penelitian..... 29
F.1. Persiapan *Formwork* dan Tulangan 29
F.2. Pengecekan Nilai *Slump* 29
F.3. Pembuatan Benda Uji 30
F.4. Perawatan Benda Uji 31
F.5. Pengujian Benda Uji 32
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN 34
A. Hasil Uji Tarik Tulangan 34
B. Hasil Uji Tekan Beton..... 34
C. Hasil Analisa Balok Beton Bertulang..... 36
C.1. Kapasitas Momen 36
C.2. Hubungan Beban dan Lendutan 37
C.3. Hubungan Beban dan Regangan Beton 40
C.4. Hubungan Beban dan Regangan Baja 42
D. Pola Retak Balok..... 44
D.1. Balok Normal 44
D.2. Balok *Hybrid*..... 45
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN..... 48

A. Kesimpulan 48
B. Saran 48
DAFTAR PUSTAKA 49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Diagram Tegangan-Regangan Beton Bertulang 9
Gambar 2. Jenis Retak Beton Bertulang..... 10
Gambar 3. Distribusi Regangan Penampang Balok..... 13
Gambar 4. Kode Identifikasi Resin..... 15
Gambar 5. Diagram Alir Penelitian..... 21
Gambar 6. Lokasi Penelitian 23
Gambar 7. Alat Uji Pembebanan (a) *Static Loading Frame*, (b) *Data Logger* TDS 530, (c) *Load Cell* 200 kN 24
Gambar 8. Alat *Universal Testing Machine*..... 24
Gambar 9. LVDT 100 mm..... 25
Gambar 10. (a) *Strain Gauge* Beton, (b) *Strain Gauge* Baja..... 25
Gambar 11. (a) *CN Adhesive* Sebagai Perekat *Srain Gauge* Dengan Permukaan Baja, (b) *CN-E Adhesive* Sebagai Perekat *Strain Gaug*e Dengan Permukaan Beton..... 26
Gambar 12. (a) Cacahan Botol Plastik PET, (b) Serat Baja (Dramix 3D 80/60)..... 26
Gambar 13. (a) Desain Benda Uji Balok Normal (NB), (b) Potongan A-A Balok Normal, (c) Potongan B-B Balok Normal..... 28
Gambar 14. (a) Desain Benda Uji Balok *Hybrid* (HB), (b) Potongan A-A Balok *Hybrid*, (c) Potongan (B-B) Balok *Hybrid*..... 28
Gambar 15. Posisi *Strain Gauge* (a) Pada Tulangan, (b) Pada Beton..... 29
Gambar 16. Perakitan *Formwork* Dan Tulangan Benda Uji Balok 29
Gambar 17. *Slump* Pengecoran Benda Uji 30
Gambar 18. Pengecoran Benda Uji Balok 31
Gambar 19. Perawatan Benda Uji Balok 32
Gambar 20. Sketsa Pengujian Benda Uji Balok..... 32
Gambar 21. *Setting* Alat Dan Benda Uji..... 33
Gambar 22. Hubungan Beban-Lendutan 38
Gambar 23. Grafik Hubungan Beban-Regangan Beton Benda Uji Balok 41

Gambar 24. Grafik Hubungan Beban-Regangan Baja Benda Uji Balok .. 43
Gambar 25. Pola Retak Balok Normal 45
Gambar 26. Pola Retak Balok *Hybrid* 46

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Komposisi Bahan Campuran Beton 21
Tabel 2. Variasi Benda Uji 27
Tabel 3. Hasil Pengujian Tarik Tulangan 34
Tabel 4. Hasil Kuat Tekan..... 35
Tabel 5. Kapasitas Momen Dan Beban Benda Uji 37
Tabel 6. Hubungan Beban-Lendutan Balok 39
Tabel 7. Hubungan Beban-Regangan Beton 40
Tabel 8. Hubungan Beban-Regangan Baja 44

BAB 1. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Dalam dunia konstruksi, beton bertulang sudah banyak diterapkan di berbagai struktur bangunan seperti gedung, tunnel, jalan, dan jembatan. Menurut SNI 03-2847-2002 beton bertulang adalah beton yang ditulangi dengan luas dan jumlah tulangan yang tidak kurang dari nilai minimum, yang disyaratkan dengan atau tanpa prategang dan direncanakan berdasarkan asumsi bahwa kedua material bekerja bersama-sama dalam menahan gaya yang bekerja. Struktur beton bertulang pada suatu konstruksi didesain untuk memenuhi kriteria kekuatan tekan pada beton dan kekuatan tarik pada tulangan baja yang bekerja secara bersamaan agar tidak terjadi kegagalan pada struktur.

Beton bertulang membutuhkan mutu beton yang tinggi agar mampu menahan gaya tekan juga membutuhkan mutu baja yang tinggi agar mampu menahan gaya tarik. Kedua gaya ini, gaya tekan dan gaya tarik, bekerja pada daerah yang berbeda secara bersamaan. Beton tidak bekerja secara utuh pada sisi tarik. Berbeda pada sisi tekan, beton bekerja menahan gaya tekan yang terjadi. Pada balok beton bertulang, sisi tarik mengalami regangan yang lebih besar ketika diberikan beban sehingga keberadaan beton di sisi tarik harusnya dapat diminimalisir dari segi mutu dan penggunaan material agar lebih ekonomis.

Pemanfaatan limbah sebagai material tambahan pada campuran beton membantu mengurangi penggunaan material alam yang ketersediaannya semakin terbatas. Selain itu, pemanfaatannya dapat membantu mengurangi pencemaran yang terjadi di udara, air, dan tanah. Limbah plastik misalnya, membutuhkan waktu ratusan tahun agar dapat terurai.

Kebanyakan orang tertarik pada gaya hidup praktis di kehidupan sehari-hari, seperti menggunaan botol minuman kemasan plastik yang sangat praktis, terjangkau, dan murah. Namun, hal ini bertentangan dengan salah satu Tujuan Pembangunan Berkelanjutan atau *Sustainable Development Goals* 2015-2030 yang ditetapkan oleh PBB (Perserikatan Bangsa-bangsa) dan diresmikan tahun 2015 yaitu menjamin pola konsumsi dan produksi yang berkelanjutan. Sehingga menjadi sangat perlu dalam dunia konstruksi untuk memanfaatkan limbah botol plastik sebagai wujud dalam merealisasikan tujuan global tersebut.

Polyethilene yang terkandung pada plastik merupakan material ringan yang dapat digunakan pada beton. Penggunaan agregat ringan sintetis dalam beton akan mengurangi CO_2 emisi, sebagai bahan ringan mengakibatkan bagian elemen yang lebih kecil, yang akhirnya membutuhkan lebih sedikit semen (Choi dkk, 2009).

Berdasarkan uraian tersebut di atas, maka penulis merasa perlu melakukan penelitian beton *hybrid* dengan penggunaan material tambahan limbah plastik pada sisi tarik beton bertulang dengan judul "**Kuat Lentur**

dan Pola Retak Balok *Hybrid* Beton Bertulang dengan Material Limbah Plastik PET".

B. Rumusan Masalah

Perumusan masalah dalam penelitian ini dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Bagaimana kapasitas lentur balok *hybrid* beton bertulang yang menggunakan material limbah plastik PET?
2. Bagaimana pola retakan pada balok *hybrid* beton bertulang yang menggunakan material limbah plastik PET?

C. Tujuan Penelitian

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

1. Menganalisa kapasitas lentur balok *hybrid* beton bertulang yang menggunakan material limbah plastik PET.
2. Menganalisa pola retakan pada balok *hybrid* beton bertulang yang menggunakan material limbah plastik PET.

D. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai kapasitas lentur dan pola retak yang terjadi pada balok *hybrid* beton bertulang dengan menggunakan material limbah plastik PET. Selain itu,

juga sebagai referensi untuk penelitian lanjutan mengenai penggunaan balok *hybrid* dengan mutu beton yang berbeda pada sisi tekan dan sisi tarik.

E. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam melakukan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Balok beton yang digunakan pada penelitian ini adalah balok beton bertulang di atas dua tumpuan sederhana.
2. Bentuk penampang yang digunakan adalah persegi empat, dengan ukuran balok yaitu 15 cm x 25 cm x 330 cm.
3. Penelitian menggunakan cacahan limbah plastik jenis PET yang tertahan saringan No. 4 (4.75 mm) sebanyak 10% dari berat semen.
4. Serat baja yang digunakan adalah Dramix 3D 80/60.

F. Sistematika Penulisan

Untuk mempermudah penulisan tugas akhir ini, maka penulis uraikan dalam sistematik penulisan yang dibagi dalam beberapa pokok bahasan, yaitu:

BAB 1. PENDAHULUAN

Bab ini memuat gambaran secara singkat dan jelas tentang latar belakang mengapa penelitian ini perlu dilaksanakan. Dalam bab ini juga memuat rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi teori-teori yang memiliki keterkaitan dengan topik permasalahan dan dijadikan sebagai acuan penelitian.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menyajikan lokasi dan waktu penelitian, alat-alat yang digunakan saat penelitian, material penelitian, banda uji dan tahapan penelitian.

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas hasil dari penelitian yang telah dilakukan yaitu hubungan beban lendutan, tegangan-regangan, dan pola retak pada balok *hybrid* beton bertulang.

BAB 5. PENUTUP

Bab ini mencakup kesimpulan secara ringkas sesuai analisa dari hasil penelitian serta saran-saran yang diajukan.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Penelitian Sebelumnya

Ataria R.B dan Wang Y.C (2019) melakukan penelitian tentang perilaku tekuk dan geser dari dua lapis balok dengan satu lapisannya terbuat dari beton dengan agregat karet daur ulang pada sisi tarik. Tujuan dari penelitian ini ialah mengetahui kemampuan beton menggunakan agregat dan potongan karet dari roda ban yang pada umumnya digunakan pada balok beton bertulang. Efek dari penggantian beton pada sisi tarik yang didukung oleh balok beton bertulang dengan beton yang lebih lemah yang terbuat dari karet dan agregat daur ulang. Kekuatan tekuk dari dua lapisan balok ditemukan kesamaan dengan balok normal yang didukung pula pada kondisi-kondisi yang lain. Penggunaan agregat daur ulang beton dengan karet ban di sisi tarik mengurangi sedikit kekakuan balok.

Rita Irmawaty dkk (2019) melakukan penelitian tentang pemanfaatan limbah plastik sebagai pengganti agregat kasar. Tujuan penelitian tersebut untuk mengetahui perilaku mekanik pada beton serat yang menggunakan limbah plastik PET pengganti sebagian agregat. Sampel benda uji berupa silinder 10cm x 20cm dan balok 10cm x 10cm x 40cm. Metode yang digunakan adalah studi eksperimental dengan variasi kadar plastik PET sebesar 0%, 10%, 15%, dan 20% terhadap volume agregat kasar. Pengujian mekanik pada beton diperoleh bahwa semakin besar penambahan kadar plastik PET, maka semakin besar penurunan nilai kuat

tekan, kuat lentur, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas beton. Namun penambahan plastik PET lebih dari 10% menurunkan workability beton secara signifikan sehingga perlu ditambahnkan *superplasticizer* untuk memperbaiki *workability* beton. Pola retak semua benda uji memperlihatkan pola yang sama dengan bentuk kolumnar.

Rita Irmawaty dkk (2016) melakukan penelitian tentang perilaku lentur balok beton dengan bahan pengisi styrofoam. Persentasi styrofoam yang ditambahkan pada beton 30% dari volume beton. Dimensi benda uji adalah 12 cm x 20 cm x 310 cm. Benda uji terdiri dari balok beton normal (NC), balok beton styrofoam (SFC) dan balok beton styrofoam dengan perkuatan CFRP (SFC-CFRP). Hasil pengujian SFC dibandingkan dengan NC, sementara hasil pengujian SFC dibandingkan dengan SFC-CFRP. Hasil penelitian menunjukkan kapasitas lentur SFC menurun sebesar 30% dibandingkan NC. Namun, apabila diperkuat dengan CFRP, kapasitas lentur SFC-CFRP meningtkat sebesar 37.74% dibandingkan SFC.

B. Beton Bertulang

Beton adalah suatu campuran yang terdiri dari agregat kasar, agregat halus, yang dicampur menjadi satu dengan semen dan air. Terkadang, beton juga ditambahkan satu atau lebuh bahan aditif untuk menghasilkam karakteristik tertentu, seperti durabilitas, kemudahan pengerjaan (*workability*), dan waktu pengerasan. Beton kuat terhadap tekan, tetapi lemah terhadap tarik sehingga perlu tulangan untuk menahan

gaya utarik untuk memikul beban-beban yang bekerja pada beton (Nawy, 2010).

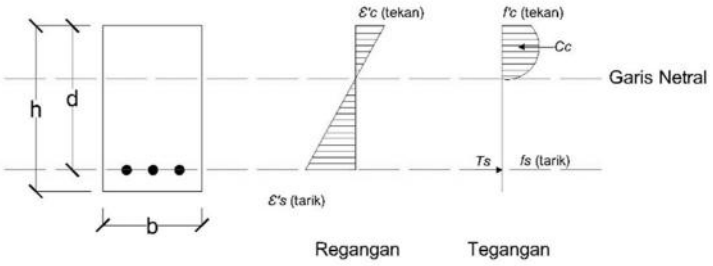
Beton bertulang adalah kombinasi antara beton dan tulangan baja yang berfungsi menyediakan kuat tarik yang tidak dimiliki oleh beton. Balok merupakan elemen komponen dalam sistem struktur bangunan. Balok adalah elemen struktur yang menyalurkan beban-beban tributary dari slab lantai ke kolom penyangga vertikal (Nawy, 2010).

Asumsi-asumsi yang digunakan dalam menetapkan perilaku penampang adalah sebagai berikut:

1. Distribusi regangan dianggap linier. Asumsi ini berdasarkan hipotesis Bernoulli yaitu penampang yang datar sebelum mengalami lentur akan tetap datar dan tegak lurus terhadap sumbu netral setelah mengalami lentur.
2. Regangan pada baja dan beton di sekitarnya sama sebelum terjadi retak beton atau leleh baja.
3. Beton lemah terhadap tarik. Beton akan retak pada taraf pembebanan kecil, yaitu sekitar 10% dari kakuatan tekannya. Akibatnya bagian beton yang mengami tarik pada penampang diabaikan dalam perhitungan analisis dan desain, juga tulangan tarik yang ada dianggao memikul gaya tarik tersebut.

Nilai tegangan pada daerah tekan beton bersifat linear atau kira-kira sebanding dengan regangannya hanya sampai pada tingkat pembebanan

tertentu pada kondisi 0.45 f'c. Pada tingkat pembebanan ini, apabila beban ditambah terus menerus mendekati pembebanan ultimit maka keadaan sebanding tersebut akan lenyap dan diagram tegangan tekan pada penampang beton akan membentuk seperti kurva seperti yang terlihat pada Gambar 1 dimana bentuk distribusi tegangan ini berupa garis lengkung dengan nilai nol pada garis netral.



Gambar 1. Diagram Tegangan-Regangan Beton Bertulang

Dengan demikian maka bentuk penampang beton pada daerah tarik tidaklah mempengaruhi kekuatan lentur. Tinggi penampang yang menentukan adalah tinggi efektif *d*, yaitu jarak dari serat tekan terluar terhadap titik berat tulangan tarik. Nilai regangan beton tekan maksimum pada serat tekan terluar umumnya sebesar 0.003.

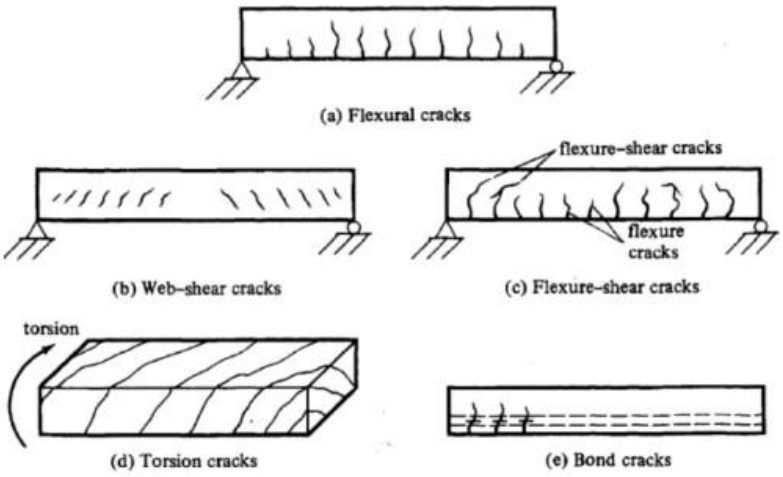
C. Kapasitas Lentur

Balok beton bertulang akan mengalami deformasi dan lentur dikarenakan beban-beban yang bekerja pada balok seperti beban gravitasi, beban angin, beban-beban lain, beban karena perubahan temperatur atau juga beban karena susut. Apabila bebannya bertambah, maka balok mengalami deformasi dan regangan tambahan yang mengakibatkan

timbulnya (atau bertambahanya) retak lentur disepanjang bentang balok. Bila bebannya semakin bertambah, pada akhirnya dapat terjadi keruntuhan elemen struktur yaitu pada beban luarnya mencapai kapasitas elemen taraf pembebanan atau disebut keadaan limit atau keruntuhan pada lentur (Nawy, 2010).

D. Pola Retak

Dalam buku McCocrmac J. C. (2004) Ada beberapa jenis retak yang terjadi pada beton bertulang.



Gambar 2. Jenis Retak Beton Bertulang

a. Retak lentur adalah retak vertikal yang memanjang dari sisi tarik balok dan mengarah ke atas sampai daerah sumbu netralnya. Retak ini diperlihatkan pada Gambar 2 (a). jika balok mempunyai *web* yang sangat tinggi (lebih dari 3 atau 4 *ft*), 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 daripada di bagian dasarnya.

b. Retak miring karena geser dapat terjadi pada bagian *web* balok beton bertulang baik sebagai retak bebas atau perpanjangan retak lentur. Kadang-kadang, retak mirirng akan berkembang secara bebas pada balok meskipun tidak ada retak lentur pada daerah tersebut. Retak ini, yang disebut retak geser *web* dan diperlihatkan pada Gambar 2 (b), kadang-kadang terjadi pada *web-web* penampang prategang, terutama penampang dengan *flens* yang besar dan *web* yang tipis.
c. Retak geser miring yang paling umum adalah retak geser-lentur, yang ditunjukkan pada Gambar 2 (c). Retak ini umumnya terjadi pada balok prategang dan non prategang.
d. Retak puntir (*torsion crack*), yang ditunjukkan pada Gambar 2 (d), cukup mirip dengan retak geser terkecuali retak puntir ini melingkar di sekeliling balok. Jika sebuah bangunan beton tanpa tulangan menerima torsi murni, batang tersebut akan retak dan runtuh di sepanajang garis spiral 45˚ karena tarik diagonal yang disebabkan tegangan puntir. Meskipun tegangan puntir mirip dengan tegangan geser, namun tegangan puntir terjadi di seluruh permukaan batang. Akibatnya, tegangan puntir ini menambah tegangan geser pada satu sisi dan mengurangi tegangan geser pada sisi yang lain.

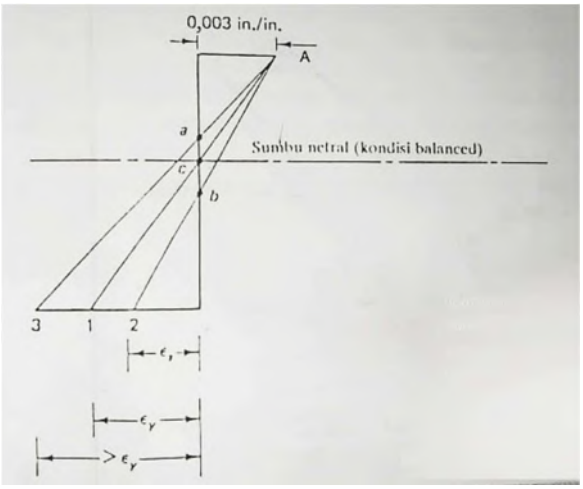
e. Kadang-kadang tulangan tegangan lekatan (*bond stress*) antara beton dan tulangannya mengakibatkan pemisahan di sepanjang tulangan, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2 (e).

Pada dareah yang mengalami keruntuhan lentur, retak terutama terjadi pada sepertiga tengah bentang, dan tegak lurus terhadap arah tegangan utama. Retak-retak ini disebabkan oleh tegangan geser yang sangat kecil dan tegangan lentur yang dominan yang besarnya hampir mendekati tegangan horizontal maksimum. Dalam keadaan runtuh lentur demikian, beberapa retak halus berarah vertical terjadi di daerah tengah bentang sekitar 50% yang diakibatkan oleh beban runtuh lentur (Nawy, 2010).

Perilaku balok bertulang pada keadaan runtuh karena geser sangat berbeda dengan keadaan runtuh karena lentur. Balok tersebut langsung hancur tanpa adanya peringatan terlebih dahulu. Juga retak diagonalnya jauh lebih lebar dibandingkan dengan retak lentur. Akibat keruntuhan tekan geser dimulai dengan timbulnya retak lentur halus vertical di tengah bentang, dan tidak terus menjalar, karena terjadinya kehilangan lekatan antara tulangan membujur (longitudinal) dengan beton disekitarnya pada daerah perletakan. Setelah itu diikuti dengan retak miring, yang lebih curam daripada retak diagonal tarik, secara tiba-tiba dan menjalar terus menuju sumbu netral.

E. Keruntuhan Balok

Nawy, E. G. (2010) dalam bukunya terdapat jenis keruntuhan yang dialami oleh balok beton bertulang apakah terjadi leleh akibat tulangan tarik ataukah akibat hancurnya beton yang tertekan maka balok dikelompokkan kedalam 3 kelompok berikut:



Gambar 3. Distribusi Regangan Penampang Balok

1. Penampang *balanced*. Tulangan tarik mulai meleleh tepat saat beton mencapai regangan batasnya dan akan hancur karena tekan. Pada awal terjadinya keruntuhan, regangan tekan yang diizinkan pada serat tepi yang tertekan adalah 0.003 sedangkan regangan baja sama dengan regangan lelehnya yaitu $\epsilon_y = f_y / E_c$.
2. Penampang *over-reinforced*. Keruntuhan ditandai dengan hanncurnya beton yang tertekan. Pada awal keruntuhan, regangan baja ϵ_s yang terjadi masih kecil dari regangan lelehnya, ϵ_y. Dengan demikian tegangan baja f_s juga lebih kecil dari tegangan lelehnya, f_y. Kondisi ini

terjadi apabila tulangan yang digunakan lebih banyak daripada yang diperlukan dalam keadaan *balanced*.

3. Penampang *under-reinforced*. Keruntuhan ditandai dengan terjadinya leleh pada tulangan baja. Tulangan baja terus bertambah panjang dan bertambahnya regangan diatas ϵ_y. Kondisi penampang yang demikian dapat terjadi apabila tulangan yang dipakai pada balok kurang dari yang diperlukan untuk kondisi *balanced*.

F. Plastik

Menurut Choi, dkk (2009) penggunaan agregat ringan sintetis dalam beton akan mengurangi emisi CO_2, karena materialmya yang lebih ringan mengakibatkan bagian elemen juga semakin kecil sehingga hanya membutuhkan penggunaan sedikit semen. Selain itu, dengan menggunakan agregat sintetik dalam beton dapat mengurangi limbah di pembuangan TPA dan mengurangi penggunaan sumber daya alam.

ASTM D7611 mengklasifikasikan jenis plastik kedalam beberapa Kode Identifikasi Resin (*Resin Identification Code*), yaitu mulai dari kode simbol angka 1 hingga angka 7. Setiap kode simbol angka tingkatan tersebut dikelilingi oleh tiga anak panah yang berbentuk segitiga, dibawah segitiga tersebut terdapat singkatan nama jenis plastik (Gambar 4). Kode-kode simbol tersebut biasanya dapat kita temukan di bagian bawah produk plastik.

Gambar 4. Kode Identifikasi Resin

F.1. PET (*Polyethylene Teraphthalate*) atau Kode 1

PET atau PETE merupakan salah satu plastik yang sering digunakan sebagai wadah makanan. Plastik PET dapat kita temukan pada hampir semua botol air mineral dan beberapa pembungkus. Plastik ini dirancang untuk satu kali penggunaan saja. Jadi, jika digunakan berulang dapat meningkatkan resiko ikut terkonsumsinya bahan plastik dan bakteri yang berkembang pada bahan itu. Hal ini disebabkan jenis plastik PET ini sulit untuk dibersihkan dari bakteri dan bahan plastik PET dapat bersifat racun. Plastik ini sebaiknya didaur ulang dan tidak digunakan kembali.

F.2. HDPE (*High-Density Polyethylene*) atau Kode 2

Plastik HDPE merupakan jenis plastik yang biasanya digunakan untuk membuat botol susu, botol deterjen, botol shampo, botol pelembab, botol minyak, mainan, dan beberapa tas plastik. HDPE merupakan plastik yang paling umum didaur ulang dan dianggap plastik paling aman. Proses daur ulang plastik ini cukup sederhana dan tidak membutuhkan biaya banyak. Plastik HDPE ini sangat keras dan tidak mudah rusak karena pengaruh sinar matahari, panas yang tinggi, atau suhu yang dingin. Karena itu, HDPE digunakan untuk membuat meja piknik, tempat sampah, dan produk lain yang membutuhkan ketahanan terhadap cuaca.

F.3. PVC (*Polyvinyl Chloride*) atau Kode 3

Plastik PVC memiliki sifat lembut dan fleksibel. Plastik jenis ini biasa digunakan untuk membuat plastik pembungkus makanan, botol minyak sayur, dan mainan anak-anak seperti pelampung renang. Selain itu juga digunakan untuk membuat pipa plastik, dan komponen kabel komputer. PVC dikhawatirkan sebagai “plastik beracun” karena mengandung berbagai racun yang dapat mencemari makanan. Plastik ini juga sukar didaur ulang. Produk PVC sebaiknya tidak digunakan kembali sebagai pembungkus makanan.

F.4. LDPE (*Low-Density Polyethylene*) atau Kode 4

LDPE biasa ditemukan pada pembungkus baju, kantung pada layanan cuci kering, pembungkus buah-buahan agar tetap segar, dan pada botol pelumas. LDPE dianggap memiliki tingkat racun yang rendah dibandingkan dengan plastik yang lain. LDPE tidak umum untuk didaur ulang, jika didaur ulang plastik LDPE biasanya digunakan sebagai bahan pembuat ubin lantai.

F.5. PP (*Polypropylene*) atau Kode 5

Plastik PP bersifat kuat, ringan, dan tahan terhadap panas. Plastik PP mampu menjaga bahan yang ada di dalamnya dari kelembaban, minyak dan senyawa kimia lain. PP biasanya digunakan sebagai pembungkus pada produk sereal sehingga tetap kering dan segar. PP juga digunakan sebagai ember, kotak margarin dan yogurt, sedotan, tali, isolasi, dan kaleng plastik

cat. Plastik dari PP dianggap aman jika digunakan kembali dan dapat didaur ulang.

F.6. PS (*Polystyrene*) atau Kode 6

Polystyrene atau styrofoam merupakan plastik yang murah, ringan, dan mudah dibentuk. Biasanya plastik PS digunakan sebagai botol minuman ringan, karton telor, kotak makanan, dan pembungkus bahan yang akan dikirim dalam jarak jauh. Plastik PS ini mudah rusak dan rapuh, sehingga mudah terpotong-potong menjadi kecil dan mudah mencemari lingkungan.

F.7. Bahan Plastik Lain atau Kode 7

Bahan Plastik Lain (BPA, *Polycarbonate*, LEXAN) merupakan plastik yang biasanya digunakan untuk membuat aksesoris kendaraan, namun ada juga pabrik yang menggunakan plastik ini sebagai bahan baku botol minuman bayi dan pembungkus makanan. Salah satu zat penyusun plastik ini misalnya BPA (Bisphenol A) membahayakan tubuh.

G. Serat Baja

Menurut ACI (*American Concrete Institute*) 544 (1982), beton berserat diartikan sebagai beton yang terbuat dari semen hidrolis, agregat halus, agregat kasar dan sejumlah kecil serat yang tersebar secara acak, yang mana masih dimungkinkan untuk diberi bahan-bahan *additive*.

Menurut SNI 2847-2013, beton serat adalah beton yang mengandung serat baja yang berorientasi acak tersebar.

Serat besi bersiku (*steel fibre*) adalah serat baja yang diproduksi melalui proses penarikan dingin (*cold drawn*) dengan lekukan pada bagian ujung yang akan memberikan pengikatan yang optimal pada beton. Dengan penambahan serat besi bersiku pada beton akan memberikan daktalitas dan kemampuan menerima beban yang tinggi (*high load bearing capacity*).

Menurut Shahid Iqbal dkk (2015) penambahan serat baja pendek pada beton secara signifikan akan meningkatkan kuat tarik dan kuat lentur. Namun, pengaruh dari serat baja tidak meningkatkan modulus elastisitas dan kekuatan tekan secara signifikan.

Dramix steel fiber adalah fiber baja yang diproduksi melalui proses penarikan dingin (*cold drawn*) dengan lekukan di ujung yang akan memberikan pengikatan yang optimal. Beton yang memiliki penulangan dengan steel fiber akan memberikan kelenturan (*ductility*) dan kemampuan menerima beban yang tinggi (*high load bearing capacity*).

H. Bahan Tambah

Bahan campuran tambahan (*admixture*) adalah bahan yang ditambahkan ke dalam campuran sesaat atau selama pencampuran. Fungsi bahan ini adalah untuk mengubah sifat-sifat beton agar menjadi cocok untuk pekerjaan tertentu, atau ekonomis, atau untuk tujuan lain

seperti menghemat energi. Menurut Nawy, E. G. (2010) Jenis bahan tambah ada beberapa macam yaitu:

1. Bahan tambahan pemercepat (*accelerating admixture*)
2. Bahan tambahan untuk air-entraining (*air-entraining admixture*)
3. Bahan tambahan pengurang air dan pengontrol pengeringan
4. Bahan tambahan penghalus gradasi (*finely divided mineral admixture*)
5. Bahan tambahan untuk mengurangi/menghapus *slump*
6. Polimer
7. *Superplasticizer*

Superplasticizer merupakan bahan tambah untuk mengurangi jumlah air yang dipakai, untuk mendapatan *workability* (*flowing concrete*) yang baik. Jika jumlah air tetap dan FAS tetap maka kebutuhan akan semen menjadi minimum. Hal tersebut akan sangat menghemat biaya karena mudah dikerjakan dengan tenaga yang sedikit. *Flowing concrete* mempunyai sifat kohesif yang baik dan tidak menunjukkan *segregation*, dan kemampuan untuk mempertahankan nilai *slump* juga baik, tergantung dari jenis semen yang digunakan. Bahan ini akan meningkatkan kelecakan beton lebih lama pada waktu yang tinggi (Mulyono, 2003).