



KEPUTUSAN KEPALA BADAN STANDARDISASI NASIONAL  
NOMOR 395/KEP/BSN/9/2021  
TENTANG  
PENETAPAN STANDAR NASIONAL INDONESIA  
8970:2021 PANDUAN PERANCANGAN DAN PELAKSANAAN BETON  
STRUKTURAL BERTULANGAN BATANG SERAT BERPOLIMER

KEPALA BADAN STANDARDISASI NASIONAL,

- Menimbang :
- a. bahwa untuk memenuhi kepentingan perlindungan terhadap konsumen, pelaku usaha, tenaga kerja, masyarakat lainnya, mengembangkan tumbuhnya persaingan yang sehat, keselamatan, keamanan, kesehatan, dan kelestarian fungsi lingkungan hidup, Rancangan Akhir Standar Nasional Indonesia yang disusun oleh Komite Teknis perlu ditetapkan menjadi Standar Nasional Indonesia;
  - b. bahwa Rancangan Akhir Standar Nasional Indonesia sebagaimana dimaksud dalam huruf a, telah dikonsensuskan dan dinyatakan memenuhi persyaratan untuk ditetapkan menjadi Standar Nasional Indonesia;
  - c. bahwa berdasarkan pertimbangan sebagaimana dimaksud dalam huruf a dan huruf b, perlu menetapkan Keputusan Kepala Badan Standardisasi Nasional tentang Penetapan Standar Nasional Indonesia 8970:2021 Panduan perancangan dan pelaksanaan beton struktural bertulangan batang serat berpolimer;

- 2 -

- Mengingat :
1. Undang-Undang Nomor 20 Tahun 2014 tentang Standardisasi dan Penilaian Kesesuaian (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2014 Nomor 216, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 5584);
  2. Peraturan Pemerintah Nomor 34 Tahun 2018 tentang Sistem Standardisasi dan Penilaian Kesesuaian Nasional (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2018 Nomor 110, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 6225);
  3. Peraturan Presiden Nomor 4 Tahun 2018 tentang Badan Standardisasi Nasional (Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 10);
  4. Peraturan Badan Standardisasi Nasional Nomor 3 Tahun 2018 tentang Pedoman Pengembangan Standar Nasional Indonesia (Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2018 Nomor 578);
  5. Peraturan Badan Standardisasi Nasional Nomor 12 Tahun 2018 tentang Perubahan atas Peraturan Badan Standardisasi Nasional Nomor 1 Tahun 2018 tentang Pedoman Tata Cara Penomoran Standar Nasional Indonesia (Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2018 Nomor 1762);
- Memperhatikan :
- Surat Direktur Bina Teknik Permukiman dan Perumahan, Direktorat Jenderal Cipta Karya, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat; Nomor UM 0102-Ct/400A tanggal 1 November 2020 Hal Pelaporan Hasil Konsensus 9 Judul RSNI3 Lingkup SKT 91-01-S4 Tahun 2019;

- 3 -

MEMUTUSKAN:

Menetapkan : KEPUTUSAN KEPALA BADAN STANDARDISASI NASIONAL TENTANG PENETAPAN STANDAR NASIONAL INDONESIA 8970:2021 PANDUAN PERANCANGAN DAN PELAKSANAAN BETON STRUKTURAL BERTULANGAN BATANG SERAT BERPOLIMER.

KESATU : Menetapkan Standar Nasional Indonesia (SNI) 8970:2021 Panduan perancangan dan pelaksanaan beton struktural bertulangan batang serat berpolimer.

KEDUA : SNI 8970:2021 Panduan perancangan dan pelaksanaan beton struktural bertulangan batang serat berpolimer sebagaimana dimaksud dalam Diktum KESATU merupakan adopsi modifikasi melalui metode terjemahan satu bahasa dari standar ACI 440.1R-15 *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars*, yang ditetapkan oleh BSN tahun 2021.

KETIGA : Keputusan Kepala Badan ini mulai berlaku pada tanggal ditetapkan.

Ditetapkan di Jakarta

pada tanggal 3 September 2021

KEPALA BADAN STANDARDISASI NASIONAL,



KUKUH S. ACHMAD

**Panduan perancangan dan pelaksanaan beton  
struktural bertulangan batang serat berpolimer  
(ACI 440.1R-15, MOD)**

© ACI 2015 – All rights reserved

© BSN 2021 untuk kepentingan adopsi standar © ACI menjadi SNI – Semua hak dilindungi

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh isi dokumen ini dengan cara dan dalam bentuk apapun serta dilarang mendistribusikan dokumen ini baik secara elektronik maupun tercetak tanpa izin tertulis BSN

**BSN**

Email: [dokinfo@bsn.go.id](mailto:dokinfo@bsn.go.id)

[www.bsn.go.id](http://www.bsn.go.id)

Diterbitkan di Jakarta

## Daftar isi

Daftar isi .....	i
Daftar Gambar .....	ii
Daftar Tabel .....	ii
Prakata .....	iii
1 Pendahuluan dan ruang lingkup .....	1
1.1 Pendahuluan .....	1
1.2 Ruang lingkup .....	2
2 Simbol dan Definisi .....	2
2.1 Simbol .....	2
2.2 Definisi .....	5
3 Latar belakang .....	7
3.1 Pasal ini dipindahkan ke Lampiran B .....	7
3.2 Pasal ini dipindahkan ke Lampiran C .....	7
3.3 Karakteristik material .....	7
4 Karakteristik material .....	8
4.1 Sifat fisik .....	9
4.2 Sifat mekanis dan perilaku .....	10
4.3 Perilaku berdasarkan fungsi waktu .....	12
4.4 Efek dari api dan temperatur tinggi .....	16
5 Durabilitas .....	17
5.1 Uji durabilitas yang dipercepat .....	18
5.2 Durabilitas batang FRP .....	18
5.3 Durabilitas lekatan antara FRP dan beton .....	19
6 Pertimbangan umum desain .....	20
6.1 Falsafah desain .....	20
6.2 Sifat material untuk desain .....	20
7 Lentur .....	21
7.1 Pertimbangan umum .....	22
7.2 Kekuatan Lentur .....	23
7.3 Kemampuan layan .....	28
7.4 Keruntuhan rangkai dan fatik .....	35
8 Geser .....	36
8.1 Pertimbangan umum .....	36
8.2 Kekuatan geser komponen yang menggunakan batang FRP .....	37
8.3 Pendetailan sengkang geser .....	39
8.4 Kekuatan geser slab beton dua arah dengan batang FRP .....	40
9 Tulangan susut dan suhu .....	41
9.1 Rasio batang FRP minimum .....	41
10 Penyaluran dan sambungan lewatan tulangan .....	42
10.1 Penyaluran tegangan pada tulangan lurus .....	42
10.2 Panjang penyaluran tulangan yang dibengkokkan .....	44
10.3 Penyaluran tulangan momen positif .....	45
10.4 Sambungan lewatan tarik .....	46
11 Contoh desain .....	46
12 Referensi .....	74
Lampiran A–Pelat di tanah .....	89
Lampiran B–Perkembangan sejarah .....	90
Lampiran C–Sejarah penggunaan .....	91

## Daftar Gambar

Gambar 1.1 – Contoh batang FRP .....	1
Gambar 7.1.1 – Hubungan momen kurvatur teoretis untuk penampang beton bertulang menggunakan tulangan baja dan FRP (faktor $\phi$ sebesar 0,9, 0,65, 0,55, dan 0,65 secara berurutan untuk baja yang terkontrol tarik, GFRP yang terkontrol tekan, GFRP yang terkontrol tarik, dan CFRP yang terkontrol tekan) .....	23
Gambar 7.2.3 – Faktor reduksi kekuatan sebagai fungsi rasio tulangan .....	27
Gambar 7.4 – Distribusi tegangan - regangan elastik.....	35
Gambar 8.3 – Kebutuhan panjang ujung kait untuk sengkang FRP .....	40
Gambar 10.1 – Transfer gaya melalui lekatan.....	42
Gambar C.1 – Konstruksi dek yang diperkuat dengan FRP di Lima, OH (Jembatan Pierce Street), pada 1999.....	91
Gambar C.2 – Batang GFRP digunakan untuk konstruksi dek di Dayton, OH, Jembatan Salem Avenue pada 1999 .....	92
Gambar C.3 – Tampak transversal dari GFRP pada Jembatan Sierrita de la Curz Creek dekat Amarillo, TX, pada 2000 .....	92
Gambar C.4 – Panel dek Jembatan Emma Park dengan batang GFRP pada sisi atas dan bawah pelat.....	93
Gambar C.5 – Batang GFRP digunakan untuk alas rel kereta api.....	93
Gambar C.6 – Konstruksi dinding laut dengan batang GFRP .....	93
Gambar C.7 – Jembatan I-635 diatas State Ave. (Kansas City, KS) .....	94

## Daftar Tabel

Tabel 3.3 – Pertimbangan untuk penggunaan batang (FRP) .....	7
Tabel 4.1.1 – Kerapatan/massa jenis umum untuk batang, (g/cm <sup>3</sup> ).....	9
Tabel 4.1.2 – Koefisien ekspansi termal tipikal untuk batang* .....	9
Tabel 4.2.1 – Sifat kekuatan tarik tipikal untuk batang* .....	10
Tabel 6.2 – Faktor reduksi lingkungan untuk beragam serat dan kondisi paparan .....	21
Tabel 7.2.1 – Nilai umum untuk rasio tulangan kondisi balans untuk persegi panjang dengan $f_c' = 34,5$ MPa .....	25
Tabel 7.3.2.1 – Rekomendasi ketebalan minimum balok atau pelat satu arah nonprategang .....	31
Tabel 7.4.1 – Batas tegangan keruntuhan rangkai pada batang FRP .....	36

## Prakata

SNI 8970:2021, *Panduan perancangan dan pelaksanaan beton struktural bertulangan batang serat berpolimer* merupakan standar yang disusun dengan adopsi modifikasi dari ACI 4401R-15, *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars* dengan metode terjemahan satu Bahasa dan ditetapkan oleh BSN Tahun 2021. SNI ini semula diusulkan dalam Program Nasional Perumusan SNI (PNPS) usulan mendesak Tahun 2019 dengan judul, *Panduan perancangan dan pelaksanaan struktur beton bertulang menggunakan batang serat berpolimer*. Standar ini memberikan rekomendasi proses desain dan konstruksi struktur beton bertulang FRP untuk batang FRP nonprategang. Dasar Standar ini adalah pengetahuan yang diperoleh dari penelitian eksperimental di seluruh dunia, penelitian analitik, serta aplikasi lapangan dari penulangan FRP.

Adapun modifikasi dalam Standar ini terletak pada:

1. Pemindahan subbab yang terkait dengan sejarah beton struktural bertulangan batang serat berpolimer yaitu Bab 3.1 ke bagian Lampiran B dan Bab 3.2 ke bagian Lampiran C.
2. Pada Bab 11 yaitu Contoh desain, Satuan yang dituliskan hanya dalam SI, sehingga angka yang ada berbeda dengan standar yang diadopsi yaitu dalam imperial.
3. Terdapat beberapa gambar berwarna yaitu gambar yang berasal dari foto dokumentasi dan sifatnya hanya untuk memperjelas isi bagian Standar ini.

Standar Nasional Indonesia (SNI) ini dipersiapkan oleh Komite Teknis 91-01 Bahan dan Konstruksi Bangunan dan Rekayasa Sipil melalui Gugus Kerja Struktur Bangunan pada Subkomite Teknis 91-01-S4 Bahan, Sains, Struktur dan Konstruksi Bangunan. Selanjutnya, Sub Komite Teknis ini mengalami perubahan menjadi Komite Teknis 91-06 Pekerjaan Teknik Sipil Dan Bangunan Gedung sesuai dengan Pedoman Pengelolaan Komite Teknis Perumusan Standar Nasional Indonesia. Standar ini telah dibahas dan disepakati dalam Rapat Konsensus pada tanggal 10 Desember 2019 di Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman yang dihadiri oleh para pemangku kepentingan (*stakeholders*) terkait yaitu perwakilan dari pemerintah, pelaku usaha, konsumen dan pakar. Standar ini telah melalui tahap jajak pendapat pada tanggal 29 Maret 2021 sampai dengan tanggal 17 April 2021 dengan hasil akhir disetujui menjadi SNI.

Dalam Standar ini terdapat acuan normatif yang telah diadopsi identik menjadi SNI, antara lain:

1. ACI 318-11, *Specifications for Structural Concrete and Commentary* diadopsi menjadi SNI 2847:2019, *Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung*.
2. ACI 440.5M-08, *Specification for Construction with Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars* diadopsi dengan metode modifikasi menjadi SNI 8974:2021, *Spesifikasi pelaksanaan penggunaan batang tulangan dengan serat berpolimer*.
3. ACI 440.6M-08, *Specification for Carbon and Glass Fiber-Reinforced Polymer Bar Materials for Concrete Reinforcement* diadopsi dengan metode modifikasi menjadi SNI 8975:2021, *Spesifikasi material batang serat karbon dan serat gelas berpolimer untuk penulangan beton*.

Untuk menghindari kesalahan dalam penggunaan dokumen dimaksud, disarankan bagi pengguna standar untuk menggunakan dokumen SNI yang dicetak dengan tinta berwarna.

Apabila di kemudian hari pengguna menemukan keraguan dalam Standar ini, maka disarankan untuk melihat standar aslinya yaitu ACI 4401R-15 dan/atau dokumen terkait lain yang menyertainya.

## **SNI 8970:2021**

Perlu diperhatikan bahwa kemungkinan beberapa unsur dari dokumen standar ini dapat berupa hak paten. Badan Standardisasi Nasional tidak bertanggung jawab untuk pengidentifikasian salah satu atau seluruh hak paten yang ada.

## Panduan perancangan dan pelaksanaan beton struktural bertulangan batang serat berpolimer

### 1 Pendahuluan dan ruang lingkup

#### 1.1 Pendahuluan

Struktur beton konvensional pada umumnya diperkuat dengan baja prategang dan baja nonprategang. Pada awalnya baja terlindung dari korosi akibat sifat alkalinitas beton, yang menjadikan konstruksi tahan lama dan kuat. Untuk struktur yang berada di lingkungan agresif, seperti struktur laut, jembatan, dan garasi parkir yang terpapar garam, kombinasi dari kelembapan, suhu, serta klorin akan menurunkan sifat alkalinitas beton dan menimbulkan korosi pada batang baja. Proses korosi ini akan menyebabkan kerusakan beton dan hilangnya kemampuan layan.

Bahan komposit yang terbuat dari serat yang tertanam dalam resin polimer, juga dikenal sebagai serat berpolimer (*fiber-reinforced polymer/FRP*), merupakan alternatif yang dapat digunakan sebagai pengganti batang baja pada struktur beton. Material batang FRP terbuat dari serat aramid kontinu (AFRP), serat karbon (CFRP), atau serat gelas (GFRP) yang tertanam dalam resin. Contoh batang FRP ditunjukkan pada Gambar 1.1. Karena bahan FRP bersifat nonmagnetik dan nonkorosif, masalah gangguan akibat elektromagnetik dan korosi baja dapat dihindari dengan penggunaan batang FRP. Selain itu, bahan FRP juga mempunyai beberapa sifat, antara lain: kekuatan tarik tinggi, sehingga cocok digunakan sebagai perkuatan elemen struktural (ACI 440R; Benmokrane dan Rahman 1998; Burgoyne 2001; Cosenza et al. 2001; Dolan et al. 1999; El -Badry 1996; Figueiras et al. 2001; Humar dan Razaqpur 2000; Iyer dan Sen 1991; Sipil Jepang (*Japan Society of Civil - JSCE*) 1992, 1997a; Nanni 1993a; Nanni dan Dolan 1993; Neale dan Labossiere 1992; Saadatmanesh dan Ehsani 1998; Taerwe 1995; Teng 2001; White 1992).



**Gambar 1.1 – Contoh batang FRP**

Perilaku mekanik dari batang FRP berbeda dari perilaku batang baja konvensional. Oleh karena itu, perubahan dalam falsafah desain konvensional struktur beton diperlukan dalam aplikasi batang FRP. Polimer yang diperkuat oleh serat (*fiber-reinforced polymer/FRP*) bersifat anisotropik dan dapat diidentifikasi dengan kekuatan tarik yang tinggi hanya pada arah serat batang. Perilaku anisotropik ini mempengaruhi kekuatan geser dan kinerja batang dowel dari batang FRP juga kinerja lekatan antar material. Selain itu, bahan FRP tidak mengalami kelelahan; melainkan bersifat elastis hingga mencapai keruntuhan. Prosedur desain harus

## SNI 8970:2021

memperhitungkan rendahnya daktilitas yang dimiliki pada komponen beton struktural yang diperkuat dengan batang FRP.

Tata cara ini pertama kali dikembangkan pada tahun 2001 sebagai tata cara untuk proses desain dan konstruksi beton struktural dengan menggunakan batang FRP. Negara lain, seperti Jepang (*Japan Society of Civil Engineers* 1997b), Canada (CAN/CSA-S6-06, CAN/CSA-S806-12), and *Europe* (fib 2007, 2010) juga telah membuat tata cara serupa. Terdapat cukup informasi analitik dan eksperimental yang memadai tentang beton bertulang FRP, serta pengalaman aplikasi di lapangan yang cukup signifikan dalam mengimplementasikan teknologi ini. Aplikasi teknologi batang komposit FRP yang sukses di seluruh dunia selama beberapa dekade terakhir telah menunjukkan bahwa hal ini dapat dipergunakan dengan baik dan praktis. Penelitian serta implementasi di lapangan sedang berjalan dan rekomendasi untuk penggunaannya dalam desain akan terus berkembang. Ketika menggunakan teknologi ini, perlu dilakukan pertimbangan untuk penerapan FRP agar tepat dan sadar akan keterbatasan penggunaannya yang akan dibahas dalam tata cara ini.

**CATATAN** Setiap referensi yang mengacu ke ACI 318 dalam dokumen ini tanpa penunjukan tahun merujuk ke ACI 318-11. Kecuali jika tahun penunjukan spesifikasi disebutkan.

### 1.2 Ruang lingkup

Standar ini memberikan rekomendasi untuk proses desain dan konstruksi struktur beton bertulang FRP untuk batang FRP nonprategang; struktur beton prategang dengan tendon FRP dibahas dalam ACI 440.4R. Dasar Standar ini adalah pengetahuan yang diperoleh dari penelitian eksperimental di seluruh dunia, penelitian analitik, serta aplikasi lapangan dari penulangan FRP.

Rekomendasi perancangan berdasarkan pengetahuan terkini dimaksudkan sebagai unsur pelengkap untuk standar yang sudah ada dan sebagai petunjuk untuk struktur beton bertulang konvensional dan merupakan bantuan untuk perancangan dan pelaksanaan struktur beton yang diperkuat batang FRP bagi perancang dan pelaksana profesional berlisensi.

ACI 440.3R menyediakan daftar metode uji dan spesifikasi material sebagai tata cara untuk mendukung perancangan dan pelaksanaan. ACI 440.5 menyediakan detail spesifikasi untuk pelaksanaan dengan perkuatan batang FRP. Spesifikasi material untuk batang FRP dapat dilihat dalam ACI 440.6.

Pemakaian penulangan FRP yang dikombinasikan dengan batang baja untuk struktur beton tidak diatur dalam Standar ini.

## 2 Simbol dan Definisi

### 2.1 Simbol

$a$	= ketinggian blok tegangan persegi panjang ekuivalen (mm)
$A_f$	= luas batang (FRP), (mm <sup>2</sup> )
$A_{f,bar}$	= luas 1 batang (FRP), (mm <sup>2</sup> )
$A_{f,min}$	= luas batang minimum yang diperlukan untuk mencegah kegagalan lentur pada saat beton retak (mm <sup>2</sup> )
$A_{f,sh}$	= luas batang susut dan temperatur per satuan panjang (m), (mm <sup>2</sup> )
$A_{fv}$	= jumlah batang geser FRP dalam jarak $s$ , (mm <sup>2</sup> )
$A_{fv,min}$	= jumlah minimum batang geser FRP dalam jarak $s$ , (mm <sup>2</sup> )
$A_s$	= luas batang baja tarik, (mm <sup>2</sup> )
$b$	= lebar penampang persegi panjang, (mm)

$b_o$	=	perimeter penampang kritis untuk pelat dan alas, (mm)
$b_w$	=	lebar web, (mm)
$c$	=	jarak dari serat tekan ekstrim ke sumbu netral, (mm)
$c_b$	=	jarak dari serat tekan ekstrim ke sumbu netral pada kondisi regangan balans, (mm)
$c_c$	=	selimut bersih, (mm)
$C$	=	spasi atau dimensi selimut, (mm)
$C_E$	=	faktor reduksi lingkungan untuk berbagai jenis serat dan kondisi paparan
$d$	=	jarak dari serat tekan ekstrim ke pusat dari batang tarik, (mm)
$d_b$	=	diameter batang, (mm)
$d_c$	=	ketebalan selimut beton yang diukur dari serat tegangan ekstrim tarik ke pusat batang atau lokasi kawat terdekat dengannya, (mm)
$d_{c, sisi}$	=	ketebalan selimut beton yang diukur dari sisi sisi elemen ke pusat batang longitudinal atau lokasi kawat yang paling dekat dengannya, (mm)
$E_c$	=	modulus elastisitas beton, (MPa)
$E_f$	=	modulus elastisitas FRP desain yang didefinisikan sebagai modulus rata-rata sampel spesimen uji ( $E_f = E_{f,ave}$ ), (MPa)
$E_{f, ave}$	=	modulus elastisitas rata-rata FRP, (MPa)
$E_s$	=	modulus elastisitas baja, (MPa)
$f_c'$	=	kekuatan tekan beton, (MPa)
$\sqrt{f_c'}$	=	akar kuadrat dari kekuatan tekan beton tertentu, (MPa)
$f_f$	=	tegangan batang FRP pada kondisi tarik, (MPa)
$f_{fb}$	=	kekuatan bagian bengkok batang FRP, (MPa)
$f_{fe}$	=	tegangan batang yang dapat dikembangkan untuk sambungan lewatan $\ell_e$ , (MPa)
$f_{fr}$	=	tegangan perlu batang, (MPa)
$f_{fs}$	=	tingkat tegangan yang diinduksi dalam FRP pada kondisi beban layan, (MPa)
$f_{fs, sus}$	=	tingkat tegangan yang diinduksi dalam FRP oleh beban layan tetap, (MPa)
$f_{fu}$	=	kekuatan tarik FRP desain, didefinisikan sebagai kekuatan tarik desain dikalikan dengan faktor reduksi lingkungan ( $f_{fu} = C_E f_{fu}^*$ ), (MPa)
$f_{fu}^*$	=	kekuatan tarik terjamin dari batang FRP, didefinisikan sebagai kekuatan tarik rata-rata sampel spesimen uji dikurangkan tiga kali standar deviasi ( $f_{fu}^* = f_{fu,ave} - 3\sigma$ ), (MPa)
$f_{fv}$	=	kekuatan tarik FRP untuk desain geser, diambil sebagai terkecil dari kekuatan tarik desain $f_{fu}$ , kekuatan bagian bengkok dari Sengkang FRP $f_{fb}$ , atau tegangan yang sesuai dengan $0,004E_f$ , (MPa)
$f_s$	=	tegangan layan dalam batang baja, (MPa)
$f_{s, allow}$	=	tegangan layan yang diizinkan dalam batang baja, (MPa)
$f_{u, ave}$	=	rata-rata kekuatan tarik sampel spesimen uji, (MPa)
$f_y$	=	tegangan leleh terspesifikasi baja nonprategang (MPa)
$h$	=	tinggi keseluruhan elemen lentur, (mm)
$I$	=	momen inersia, (mm <sup>4</sup> )
$I_{cr}$	=	momen inersia penampang retak yang ditransformasikan, (mm <sup>4</sup> )
$I_e$	=	momen inersia efektif, (mm <sup>4</sup> )
$I_{e+}$	=	momen efektif inersia di lokasi momen positif maksimum, (mm <sup>4</sup> )
$I_{e1-}$	=	momen efektif inersia pada lokasi momen negatif maksimum pada bentang dekat, (mm <sup>4</sup> )
$I_{e2-}$	=	momen inersia efektif pada lokasi momen negatif maksimum pada ujung bentang, (mm <sup>4</sup> )
$I_g$	=	momen inersia kotor, (mm <sup>4</sup> )
$k$	=	rasio kedalaman sumbu netral terhadap kedalaman batang
$k_b$	=	koefisien lekatan
$K_1$	=	parameter perhitungan untuk kondisi batas
$K_4$	=	koefisien yang digunakan dalam komputasi panjang penyaluran bengkokan batang

$\ell$	=	bentang panjang elemen, (m)
$\ell_a$	=	sambungan lewatan tambahan pada tumpuan atau pada titik belok, (mm)
$\ell_{bhf}$	=	panjang penyaluran dasar dari kait standar FRP dalam kondisi tarik, (mm)
$\ell_d$	=	panjang penyaluran, (mm)
$\ell_e$	=	sambungan lewatan batang, (mm)
$\ell_{ihf}$	=	panjang ekor di luar pengait batang FRP, (mm)
$L$	=	jarak antara sambungan pada <i>slab-on-grade</i> , (m)
$M_a$	=	momen beban layan maksimum pada elemen, (N-mm)
$M_{cr}$	=	momen retak, (N-mm)
$M_n$	=	kapasitas momen nominal, (N-mm)
$M_{s, sus}$	=	momen karena beban layan tetap, (N-mm)
$M_{serv}$	=	momen kondisi layanan
$M_u$	=	momen terfaktor pada penampang, (N-mm)
$n_f$	=	rasio modulus elastisitas batang FRP terhadap modulus elastisitas beton
$r_b$	=	jari-jari internal bengkokan batang FRP, (mm)
$s$	=	spasi sengkang atau spasi pada spiral kontinu, (mm)
$s_{max}$	=	spasi maksimum batang (pusat ke pusat) yang diizinkan untuk kontrol retak lentur, (mm)
$T_g$	=	suhu transisi gelas ( <i>Glass</i> ), ( $^{\circ}\text{C}$ )
$u$	=	tegangan lekatan rata-rata yang bekerja pada permukaan batang FRP, (MPa)
$V_c$	=	kekuatan geser nominal yang disediakan oleh beton, (N)
$V_f$	=	tahanan geser yang disediakan oleh sengkang FRP, (N)
$V_n$	=	kekuatan geser nominal pada penampang, (N)
$V_s$	=	tahanan geser yang disediakan oleh sengkang baja, (N)
$V_u$	=	gaya geser terfaktor pada penampang, (N)
$w$	=	lebar retak maksimum yang diizinkan, (mm)
$w_{slab}$	=	beban mati pelat, ( $\text{N}/\text{m}^2$ )
$y_t$	=	jarak dari sumbu pusat dari penampang bruto, mengabaikan batang, ke serat tarik, (mm)
$\alpha$	=	aktor modifikasi batang atas
$\alpha_L$	=	koefisien longitudinal dari ekspansi termal, ( $1 / ^{\circ}\text{C}$ )
$\alpha_T$	=	koefisien transversal dari ekspansi termal, ( $1 / ^{\circ}\text{C}$ )
$\alpha_1$	=	rasio tegangan rata-rata dari blok tegangan persegi panjang yang setara dengan $f_c'$
$\beta$	=	rasio jarak dari sumbu netral ke serat tarik ekstrim terhadap jarak dari sumbu netral ke pusat batang tarik
$\beta_1$	=	faktor diambil sebagai 0,85 untuk kekuatan beton $f_c'$ hingga 28 MPa. Untuk kekuatan di atas 28 MPa, faktor ini berkurang dengan tingkat 0,05 per 7 MPa, kekuatan lebih dari 28 MPa, tetapi tidak diambil kurang dari 0,65
$\Delta_{(cp + sh)}$	=	defleksi tambahan karena rangkai dan susut pada beban tetap, (mm)
$(\Delta i)_{sus}$	=	defleksi langsung karena beban tetap, (mm)
$(\Delta/\ell)_{maks}$	=	batas rasio bentang terhadap lendutan
$\epsilon_c$	=	regangan pada beton
$\epsilon_{cu}$	=	tegangan ultimit pada beton
$\epsilon_f$	=	regangan pada batang FRP
$\epsilon_{f, ave}$	=	rata-rata regangan tarik pada kegagalan sampel spesimen uji
$\epsilon_{fs}$	=	level regangan yang terjadi pada batang FRP pada beban layanan
$\epsilon_{fu}$	=	regangan putus desain dari batang FRP, didefinisikan sebagai regangan putus yang dijamin dikalikan dengan faktor reduksi lingkungan ( $\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^*$ )
$\epsilon_{fu}^*$	=	regangan putus terjamin untuk batang FRP yang didefinisikan sebagai regangan tarik rata-rata pada kegagalan sampel spesimen uji dikurangi tiga kali standar deviasi ( $\epsilon_{fu}^* = \epsilon_{f, ave} - 3\sigma$ ), (mm / mm)
$\phi$	=	faktor reduksi kekuatan

$\gamma$	= parameter untuk memperhitungkan variasi dalam kekakuan sepanjang elemen
$\eta$	= rasio jarak dari serat tekan ekstrim ke pusat batang tarik ( $d$ ) terhadap tinggi keseluruhan bagian lentur ( $h$ )
$\lambda$	= faktor modifikasi yang mencerminkan pengurangan sifat mekanik beton ringan
$\lambda_{\Delta}$	= pengali untuk defleksi jangka panjang tambahan
$\mu$	= koefisien gesekan tanah dasar untuk perhitungan batang terhadap susut dan suhu
$\theta$	= sudut kemiringan sengkang atau spiral
$\rho'$	= rasio batang baja tekan; $\rho' = A_s' / bd$
$\rho_b$	= rasio batang baja yang menghasilkan kondisi regangan balans
$\rho_f$	= rasio batang FRP
$\rho_f'$	= rasio batang tekan FRP
$\rho_{f, ts}$	= rasio batang untuk mengatasi susut dan suhu
$\rho_{fb}$	= rasio batang FRP menghasilkan kondisi regangan balans
$\rho_{fv}$	= rasio batang geser FRP
$\rho_{min}$	= rasio batang minimum untuk baja
$\sigma$	= standar deviasi
$\xi$	= faktor fungsi waktu untuk beban tetap

## 2.2 Definisi

ACI menyediakan daftar definisi yang komprehensif melalui sumber *online*, “ACI Concrete Terminology,” <http://www.concrete.org/tools/concreteterminology.aspx>. Definisi yang diberikan di sini melengkapi sumber tersebut.

### **alkalinity (alkalinitas)**

Kondisi yang memiliki atau mengandung ion hidroksil (OH<sup>-</sup>); mengandung zat alkali.

### **aramid fiber (serat aramid)**

Serat organik yang berasal dari poliamida yang digabungkan ke dalam struktur cincin aromatik.

### **balanced fiber-reinforced polymer reinforcement ratio (rasio batang FRP balans )**

Jumlah dan distribusi batang pada elemen lentur sedemikian rupa sehingga dalam desain kekuatan, batang FRP untuk desain tarik mencapai regangan ultimit bersamaan dengan beton dalam kondisi tekan mencapai regangan ultimit yang diasumsikan 0,003.

### **braiding (kepangan)**

Suatu proses di mana dua atau lebih sistem benang saling terkait dalam arah bias untuk membentuk struktur terintegrasi; bahan yang dikepang berbeda dari kain tenunan dan rajutan dalam metode pengantar benang ke dalam kain dengan cara menjalin benang.

### **carbon fiber (serat karbon)**

Serat yang diproduksi dengan memanaskan bahan organik yang mengandung sejumlah besar karbon, seperti rayon, *polyacrylonitrile* (PAN), atau *pitch* dalam lingkungan yang tidak mudah bereaksi.

## SNI 8970:2021

### ***cross-link (ikatan silang)***

Lekatan kimia antara molekul-molekul polimer; peningkatan jumlah ikatan per molekul polimer akan meningkatkan kekuatan dan modulus dengan mengorbankan sifat daktilitas material.

### ***deformability factor (faktor deformabilitas)***

Rasio penyerapan energi (area di bawah kurva momen-kurvatur) pada kekuatan ultimit penampang terhadap kapasitas penyerapan energi pada tingkat layan.

### ***degradation (degradasi)***

Perubahan, baik yang bersifat kimia pada struktur, sifat fisik, ataupun penampilan FRP yang bersifat merusak.

### ***E-Glass (E-Glass)***

Jenis gelas dengan komposisi kalsium alumina boro-silikat dan nilai kandungan alkali maksimum 2,0 persen.

### ***endurance limit (batas daya tahan)***

Jumlah siklus deformasi atau beban yang dapat menyebabkan material, spesimen uji, atau komponen struktural gagal.

### ***fiber-reinforced polymer (FRP) bar (batang serat berpolimer)***

Material komposit yang dibentuk menjadi bentuk panjang dan ramping yang cocok digunakan untuk perkuatan beton dan terdiri dari serat searah longitudinal yang diikat dan dibentuk oleh bahan resin polimer yang kaku.

### ***fiber volume fraction (fraksi volume serat)***

Rasio volume serat terhadap volume komposit.

### ***fiber weight fraction (fraksi berat serat)***

Rasio berat serat terhadap berat komposit.

### ***glass fiber (serat gelas)***

Serat yang diambil dari hasil produk fusi anorganik yang telah mendingin tanpa mengkristal.

### ***grid (kisi)***

Susunan kaku FRP dalam dua dimensi (planar) atau tiga dimensi (spasial) yang membentuk kisi-kisi yang saling berdekatan yang dapat digunakan untuk memperkuat beton.

### ***precursor (prekursor)***

Untuk serat karbon atau grafit, serat rayon, PAN, atau *pitch* dari mana serat karbon dan grafit berasal.

### ***pultrusion (cetak tarik)***

Sebuah proses yang berkelanjutan dalam pembuatan komposit yang memiliki bentuk penampang yang seragam; proses terdiri dari menarik bahan serat perkuatan melalui bak impregnasi resin kemudian melalui cetakan pembentuk dimana resin selanjutnya dilakukan perawatan.

### ***vinyl esters (vinil ester)***

Kelas resin termosetting yang mengandung ester akrilik, asam metakrilat, atau keduanya, dimana banyak di antaranya dibuat dari resin epoksi.

### 3 Latar belakang

#### 3.1 Pasal ini dipindahkan ke Lampiran B

#### 3.2 Pasal ini dipindahkan ke Lampiran C

#### 3.3 Karakteristik material

Karakteristik material dari batang FRP harus dipertimbangkan dalam menentukan apakah batang FRP cocok atau diperlukan dalam konstruksi struktur tertentu. Karakteristik material FRP dijelaskan secara detail pada Pasal 5. Tabel 3.3 memberikan beberapa arahan untuk kondisi yang sesuai untuk aplikasi penggunaan batang FRP.

**Tabel 3.3 – Pertimbangan untuk penggunaan batang (FRP)**

<b>Mengapa batang FRP harus dipertimbangkan?</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Tahan terhadap klorin dan bahan kimia</li> <li>b) Kekuatan tarik lebih tinggi dari baja</li> <li>c) Ringan – <math>\frac{1}{4}</math> hingga <math>\frac{1}{5}</math> dari berat batang baja</li> <li>d) Tidak terpengaruh medan magnet, gelombang radio (khusus <i>Glass-FRP</i>)</li> <li>e) Bersifat nonkonduktif baik terhadap temperature atau elektrik (khusus <i>Glass-FRP</i>)</li> <li>f) Selimut beton lebih efisien</li> <li>g) Kebutuhan campuran (<i>admixture</i>) untuk mengurasi korosi tidak diperlukan</li> <li>h) Ketahanan terhadap fatik yang tinggi</li> <li>i) Dapat dengan mudah dibongkar untuk struktur sementara</li> <li>j) Mempunyai umur layan yang lebih tinggi untuk lingkungan korosif</li> <li>k) Penanganan yang lebih baik terhadap kerusakan</li> </ul>
<b>Perbedaan antara FRP dan Baja</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>a) FRP bersifat elastik linear hingga mencapai kegagalan, sedangkan baja mengalami kelelahan</li> <li>b) FRP bersifat anisotropik sedangkan baja isotropik</li> <li>c) Karena modulus batang FRP lebih rendah, desain untuk kemampuan layan sering kali menjadi penentu dalam proses desain</li> <li>d) Batang FRP mempunyai ambang rangkai yang lebih rendah dari baja</li> <li>e) Koefisien ekspansi termal berbeda untuk arah longitudinal dan radial</li> <li>f) Ketahanan terhadap api dan aplikasi suhu tinggi lebih rendah dari baja</li> <li>g) Jika terjadi degradasi pada batang FRP, mekanisme degradasi lebih bersahabat pada beton di sekitarnya, tidak seperti baja yang meluas dan menyebabkan kegagalan elemen.</li> </ul>
<b>Dimana batang FRP harus dipertimbangkan?</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Setiap elemen beton yang rentan terhadap korosi oleh ion klorida atau senyawa kimia</li> <li>b) Setiap elemen beton yang membutuhkan perkuatan nonlogam karena gelombang elektromagnetik</li> <li>c) Sebagai alternatif ekonomis terhadap perkuatan batang epoksi dan galvanis</li> <li>d) Penghematan terhadap penggunaan batang <i>stainless steel</i></li> <li>e) Dimana peralatan kontruksi akan merusak elemen yang diperkuat, khususnya pada pertambangan dan pemboran terowongan</li> <li>f) Aplikasi yang memerlukan nonkonduktivitas temperatur</li> <li>g) Pada struktur beton masif yang terpapar klorin laut pada aplikasi gabungan dengan baja</li> </ul>

Sifat ketahanan korosi dari batang FRP adalah perilaku yang bermanfaat untuk struktur yang berada di lingkungan yang sangat korosif seperti dinding laut dan struktur laut lainnya, dek jembatan dan bangunan atas yang terkena garam untuk menghilangkan es, dan trotoar yang diperlakukan dengan garam pencair es. Dalam struktur yang terdapat peralatan *magnetic resonance imaging* (MRI) atau peralatan lainnya yang peka terhadap medan elektromagnetik, sifat nonmagnetik dari batang FRP sangat penting. Batang FRP memiliki kekuatan tarik tinggi, penambahan panjang yang signifikan, serta menunjukkan perilaku tegangan-regangan yang linear hingga gagal. Penggunaan batang FRP harus dibatasi pada struktur yang secara signifikan akan mendapatkan manfaat dari sifat lainnya, seperti perilaku nonkorosif atau nonkonduktif dari materialnya. Karena kurangnya pengalaman dalam penggunaannya, batang FRP tidak disarankan untuk rangka momen atau zona dimana redistribusi momen diperlukan.

Penelitian pada kolom bulat dan persegi panjang yang diperkuat dengan *Glass-FRP* (GFRP) atau batang karbon FRP (CFRP) dan sengkang (De Luca et al. 2010; Tobbi et al. 2012; Pantelides et al. 2013; Afifi et al. 2013) mengindikasikan bahwa sengkang FRP melingkar terbukti efisien dalam mengekang beton dan balok GFRP dan CFRP dapat mencapai regangan tekan hingga 0,4 persen dan 0,7 persen, meyakinkan bahwa batang FRP efektif dalam menahan tekan hingga setelah beton rusak (Afifi. et al. 2013). Namun, beban rata-rata yang disalurkan ke batang FRP longitudinal dalam kolom yang diperkuat GFRP dan CFRP hanya berkisar antara 5 persen dan 12 persen dari beban maksimum. Karena efek gabungan, modulus elastisitas FRP yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan baja dan modulus elastisitas batang FRP yang lebih rendah dalam kondisi tekan dibandingkan dengan tegangan, besaran kontribusi maksimum batang FRP dalam menahan tekan yang dihitung pada regangan beton ultimit (biasanya pada  $\epsilon_{cu} = 0,003$ ) diprediksi rendah. Oleh karena itu, kontribusi batang FRP harus diabaikan ketika digunakan sebagai perkuatan pada kolom, pada komponen tekan, atau sebagai perkuatan tekan pada komponen lentur. Batang FRP tarik mengalami tekan karena kejadian pembalikan momen atau perubahan pola beban dapat diterima.

Terdapat kelebihan dan kekurangan terkait keberlanjutan/ketahanan saat membandingkan batang FRP dengan batang baja. Karena suhu tinggi yang diperlukan untuk produksi, batang baja memiliki jejak karbon yang lebih tinggi daripada batang FRP (Pearson et al. 2011). Daur ulang batang FRP, tidak semudah atau umum dijumpai seperti daur ulang batang baja. Karena FRP tidak mengalami korosi, biaya siklus layan yang diperkuat FRP cenderung lebih rendah daripada yang untuk struktur yang diperkuat baja di mana korosi baja cenderung terjadi (Pearson et al. 2011). Katz (2004) membandingkan dampak lingkungan dari perkerasan jalan yang diperkuat FRP dengan perkerasan yang diperkuat baja konvensional dan diketahui bahwa batang FRP memiliki dampak lingkungan yang jauh lebih kecil daripada perkerasan jalan yang diperkuat baja selama masa perkerasan jalan.

#### 4 Karakteristik material

Pasal ini membahas tentang sifat-sifat fisik dan mekanik batang FRP untuk memberikan pemahaman mendasar terkait perilaku material ini dan sifat-sifat yang dapat memengaruhi penggunaannya dalam struktur beton. Selain itu, efek dari durasi pembebanan, suhu, serta kelembapan juga akan dibahas.

Batang FRP bersifat anisotropik dan dapat diproduksi menggunakan berbagai teknik seperti cetak tarik, kepangan (*braiding*), dan tenun (Bank 1993; Bakis 1993). Faktor-faktor seperti volume serat, jenis serat, jenis resin, orientasi serat, efek dimensi, serta kontrol kualitas selama pembuatan memainkan peran penting dalam menentukan karakteristik batang FRP. Karakteristik material yang dijelaskan dalam Pasal ini mungkin tidak berlaku untuk semua produk yang tersedia secara komersil. Oleh karena itu, data material dari pabrikan harus dikonsultasikan terkait sifat produk tertentu. Selain itu, beberapa metode uji coba berbasis konsensus untuk batang FRP yang akan digunakan dalam beton struktural juga turut dibahas.

(ACI 440.3R; ASTM D7205; ASTM D7337; ASTM D7617; ASTM D7705; *Japan Society of Civil Engineers* 1997b).

**Tabel 4.1.1 – Kerapatan/massa jenis umum untuk batang, (g/cm<sup>3</sup>)**

Baja	GFRP (GLASS-FRP)	CFRP (FRP KARBON)	AFRP (ARAMID FRP)
7,90	1,25 – 2,10	1,50 – 1,60	1,25 – 1,40

**Tabel 4.1.2 – Koefisien ekspansi termal tipikal untuk batang\***

Arah	CTE, $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$				
	Baja	GFRP (GLASS-FRP)	CFRP (FRP KARBON)	AFRP (ARAMID FRP)	Beton <sup>†</sup>
Longitudinal, $\alpha_L$	11,7	6,0 - 10,0	(-9,0) - 0,0	(-6) - (-2)	7,2 - 10,8
Transversal, $\alpha_T$	11,7	21,0 – 23,0	74,0 - 104,0	60,0 - 80,0	7,2 - 10,8

\*Nilai tipikal untuk rasio serat volume berkisar dari 0,5 – 0,7.

<sup>†</sup>Mindess et al. (2003).

## 4.1 Sifat fisik

### 4.1.1 Kerapatan

Kerapatan — Batang FRP memiliki kerapatan berkisar dari 1,25 hingga 2,1 g/cm<sup>3</sup>, seperenam hingga seperempat dari baja (Tabel 4.1.1). Berkurangnya massa menurunkan biaya transportasi serta memudahkan penanganan batang di lokasi proyek.

### 4.1.2 Koefisien ekspansi termal

Koefisien ekspansi termal — Koefisien ekspansi termal batang FRP bervariasi dalam arah memanjang dan melintang, tergantung pada jenis serat, resin, fraksi volume serat. Koefisien ekspansi longitudinal didominasi oleh sifat serat sedangkan koefisien transversal didominasi oleh resin (Bank 1993). Tabel 4.1.2 mencantumkan koefisien longitudinal dan transversal ekspansi termal untuk FRP dan batang baja tipikal. Perhatikan bahwa koefisien ekspansi termal yang bernilai negatif menunjukkan bahwa material berkontraksi dengan peningkatan suhu dan mengembang dengan suhu yang menurun. FRP memiliki ekspansi termal dalam arah melintang yang jauh lebih tinggi daripada dalam arah longitudinal dan juga lebih tinggi daripada ekspansi termal beton yang dikeraskan (Masmoudi et al. 2005). Perbedaan antara koefisien transversal ekspansi termal batang FRP dan beton dapat menyebabkan retak di dalam beton pada kenaikan suhu dan, akhirnya, kegagalan selimut beton jika pengekang beton tidak mencukupi (Gentry dan Husain 1999; Bellakehal et al. 2013; Zaidi et al. 2013). Hasil percobaan menunjukkan bahwa koefisien transversal dari ekspansi termal batang Glass-FRP (GFRP) rata-rata adalah  $22 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , dan rasio antara koefisien ekspansi termal transversal dan longitudinal batang FRP sama dengan 4. Rasio ketebalan selimut beton dengan diameter batang,  $c / d_b$ , lebih besar dari 1,6 sudah cukup untuk menghindari retak beton pada suhu tinggi hingga 80 °C (Masmoudi et al. 2005; Zaidi dan Masmoudi 2008; Zaidi et al. 2013). Namun, hasil eksperimen menyimpulkan bahwa tidak terjadi pengurangan kekuatan lekatan yang signifikan akibat perubahan suhu hingga 60 °C (Masmoudi et al. 2011). Sebagai referensi, beton memiliki koefisien ekspansi termal yang bervariasi dari  $7,2 \times 10^{-6}$  hingga  $10,8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  dan biasanya diasumsikan bersifat isotropik.

## 4.2 Sifat mekanis dan perilaku

### 4.2.1 Perilaku tarik

Saat dibebankan tegangan tarik, batang FRP tidak menunjukkan perilaku plastik (leleh) sebelum gagal. Perilaku tarik batang FRP yang terbuat dari satu jenis bahan serat dicirikan oleh hubungan tegangan-regangan elastis yang linear sampai mencapai kegagalan. Sifat tarik dari beberapa batang FRP yang umum digunakan dirangkum dalam Tabel 4.2.1.

**Tabel 4.2.1 – Sifat kekuatan tarik tipikal untuk batang\***

	Baja	GFRP	CFRP	AFRP
Tegangan leleh nominal, (MPa)	(276 - 517)	NA	NA	NA
Kekuatan tarik, (MPa)	(483 - 1600)	(483 - 690)	(600 - 3690)	(1720 - 2540)
Modulus elastisitas, (GPa)	(200,0)	(35,0 - 51,0)	(120,0 - 580,0)	(41,0 - 125,0)
Regangan leleh, percent	0,14 - 0,25	NA	NA	NA
Regangan putus, percent	6,0 - 12,0	1,2 - 3,1	0,5 – 1,7	1,9 - 4,4

\*Nilai tipikal untuk rasio serat volume berkisar dari 0,5 - 0,7.

Kekuatan tarik dan kekakuan batang FRP dipengaruhi oleh beberapa faktor. Karena resin memiliki kekuatan tarik yang jauh lebih rendah daripada serat, rasio volume serat dengan volume keseluruhan FRP (fraksi serat-volume) mempengaruhi secara signifikan sifat tarik batang FRP. Variasi kekuatan dan kekakuan akan terjadi pada batang dengan berbagai fraksi volume serat, bahkan pada batang dengan diameter, penampilan, dan konstituen yang sama. Laju perawatan, proses pembuatan, serta kontrol kualitas pabrik juga akan memengaruhi karakteristik mekanik bilah (Wu 1990).

Tidak seperti baja, kekuatan tarik batang FRP dapat bervariasi terhadap diameter. Misalnya, balok GFRP dari tiga pabrikan berbeda menunjukkan pengurangan kekuatan tarik hingga 40 persen karena diameternya meningkat secara proporsional dari 9,5 menjadi 22,2 mm (Faza dan GangaRao 1993b). Namun, perubahan penampang yang serupa tampaknya tidak mempengaruhi kekuatan serat FRP karbon terpilih (CFRP) (Santoh 1993). Sensitivitas batang aramid FRP (AFRP) terhadap ukuran penampang bervariasi dari satu produk komersial ke produk yang lain. Misalnya, pada batang AFRP berbentuk kepang, ada pengurangan kekuatan kurang dari 2 persen karena diameter batang bertambah dari 7,3 menjadi 14,7 mm (Tamura 1993). Pengurangan kekuatan pada batang AFRP cetak tarik searah dengan penambahan permukaan serat aramid adalah sekitar 7 persen untuk diameter yang meningkat dari 3 ke 8 mm (Noritake et al. 1993). Pabrikan batang FRP harus dihubungi untuk mengetahui nilai kekuatan tertentu dari batang FRP yang berbeda ukuran.

Menentukan kekuatan batang FRP dengan pengujian tergolong menantang karena konsentrasi tegangan di dalam dan sekitar titik-titik angkur pada spesimen uji dapat menyebabkan kegagalan prematur. Genggaman alat penguji yang memadai harus memungkinkan kegagalan terjadi di tengah-tengah spesimen pengujian. Metode uji untuk menentukan kekuatan tarik dan kekakuan batang FRP tersedia di ASTM D7205.

Sifat tarik batang FRP harus diperoleh dari produsen batang. Umumnya, distribusi normal (Gaussian) dapat diasumsikan mewakili kekuatan spesimen batang (Kocaoz et al. 2005). Pabrikan harus melaporkan kekuatan tarik  $f_{fu}^*$  ( $f_{fu}^* = f_{u,ave} - 3\sigma$ ), dan juga melaporkan regangan

putus,  $\varepsilon_{fu}^*$  ( $\varepsilon_{fu}^* = \varepsilon_{u,ave} - 3\sigma$ ), dan modulus tarik tertentu  $E_f$  ( $E_f = E_{f,ave}$ ). Nilai-nilai kekuatan dan regangan ini memberikan probabilitas 99,87 persen bahwa nilai yang diindikasikan terlampaui oleh batang FRP yang serupa, asalkan ada minimum 25 spesimen diuji (Dally dan Riley 1991; Mutsuyoshi et al. 1990). Jika lebih sedikit spesimen yang diuji atau distribusi yang berbeda digunakan, teks dan manual tentang analisis statistik harus digunakan untuk menentukan tingkat kepercayaan parameter distribusi. Bagaimanapun, pabrikan dapat memberikan uraian tentang metode yang digunakan untuk memperoleh sifat tarik yang berbeda.

Sebuah batang FRP tidak dapat ditebuk setelah diproduksi (pengecualian terhadap batang FRP dengan resin termoplastik yang dapat dibentuk kembali dengan penambahan panas dan tekanan). Akan tetapi, batang FRP dengan bengkokan. Pada batang FRP yang diproduksi dengan bengkokan, terjadi pengurangan kekuatan 40% hingga 50%, dibandingkan dengan kekuatan tarik batang lurus, hal ini dapat terjadi karena serat lentur dan konsentrasi tegangan pada bagian bengkokan (Nanni et al. 1998b).

#### 4.2.2 Perilaku tekan

Meskipun penggunaan batang FRP untuk menahan tekan tidak dianjurkan, Pasal ini memberikan gambaran tentang perilaku batang FRP. Dalam literatur teknis, tidak ada pengukuran langsung rangkai yang bergantung pada waktu untuk batang FRP yang dibebani tekan. Bukti eksperimental yang diperoleh dari FRP-berbentuk cetak tarik menunjukkan bahwa rasio regangan rangkai dengan regangan awal bernilai rendah untuk tegangan hingga 26 persen dari kekuatan tekan ultimit (170 MPa) dalam penelitian ini (McClure dan Mohammadi 1995). Oleh karena itu, rangkai tidak diizinkan menyebabkan gangguan integritas geometris pada tingkat tegangan tipikal batang FRP dalam kondisi tekan.

Pengujian pada batang FRP dengan rasio panjang- diameter dari rasio 1:1 hingga 2:1 menunjukkan bahwa kekuatan tekan batang lebih rendah dari kekuatan tarik (Wu 1990). Mode kegagalan untuk batang FRP yang mengalami tekan longitudinal mencakup kegagalan tarik melintang, serat mikro, atau kegagalan geser. Mode kegagalan tergantung pada jenis serat, fraksi volume-serat, dan jenis resin. Kekuatan tekan senilai 55 %, 78 %, dan 20 % dari kekuatan tarik untuk tipikal GFRP, CFRP, dan AFRP. Pada umumnya, kekuatan tekan lebih tinggi untuk batang dengan kekuatan tarik tinggi, kecuali dalam kasus AFRP, di mana serat menunjukkan perilaku nonlinear dalam tekan pada tingkat tegangan yang relatif rendah.

Modulus elastisitas kompresi batang FRP lebih kecil dari modulus elastisitas tariknya. Pengujian pada sampel yang mengandung 55 % hingga 60 % volume fraksi serat gelas (*Glass-FRP*) kontinu dalam matriks vinil ester atau resin poliester isofalat menunjukkan modulus elastisitas kompresi antara 35 GPa hingga 48 GPa (Wu 1990) . Menurut laporan, modulus elastisitas tekan adalah sekitar 80 persen untuk GFRP, 85 persen untuk CFRP, dan 100 persen untuk AFRP dari modulus elastisitas tarik untuk produk yang sama (Mallick 1988; Ehsani 1993). Penjelasan yang banyak diterima untuk nilai modulus elastisitas tekan yang sedikit lebih rendah adalah kegagalan prematur dalam tes yang dihasilkan dari *end brooming* dan penekukan mikro serat internal di bawah beban tekan.

Standar metode uji belum ditetapkan untuk tes yang menunjukkan perilaku tekan batang FRP. Jika sifat tekan dari batang FRP tertentu diperlukan, maka data harus diperoleh dari produsen batang. Pabrikan juga harus memberikan deskripsi metode pengujian yang digunakan untuk mendapatkan sifat tekan yang terlampir.

### 4.2.3 Perilaku geser

Sebagian besar komposit batang FRP relatif lemah terhadap geser interlaminar di mana lapisan resin yang tidak diperkuat terletak di antara lapisan serat. Karena biasanya tidak ada batang di seluruh lapisan, kekuatan geser interlaminar ditentukan oleh matriks polimer yang relatif lemah. Orientasi serat dalam arah luar bidang terhadap lapisan serat akan meningkatkan ketahanan geser, bergantung pada tingkat *offset* yang digunakan. Untuk batang FRP, hal ini dapat dilakukan dengan menjalin atau melilitkan serat melintang ke serat utama. Serat luar bidang juga dapat ditempatkan dalam proses cetak tarik dengan memasukkan serat kontinu pada *roving/mat creel*. Jika diperlukan sifat geser dari batang FRP tertentu, maka data harus diperoleh dari produsen batang. Pabrikan harus memberikan deskripsi metode pengujian yang digunakan untuk mendapatkan nilai geser yang dilaporkan.

### 4.2.4 Perilaku lekatan

Kinerja lekatan batang FRP tergantung pada desain, proses pembuatan, sifat mekanik, dan kondisi lingkungan (Al-Dulaijan et al. 1996; Nanni et al. 1997; Bakis et al. 1998; Bank et al. 1998; Freimanis et al. 1998). Ketika mengangkur batang baja dalam beton, gaya lekatan dapat dipindahkan dengan gaya tahanan adhesi antar permukaan, juga dikenal sebagai lekatan kimia; tahanan gesekan antarmuka terhadap slip; dan *interlock* mekanis karena ketidakberaturan antar permukaan.

Pada batang FRP, dinyatakan bahwa gaya lekatan ditransfer melalui resin ke serat batang, dan kegagalan lekatan geser pada resin juga dapat terjadi. Ketika batang ulir terlekat mengalami peningkatan tegangan, adhesi antara batang dan beton di sekitarnya rusak/terlepas, dan deformasi pada permukaan batang dapat menyebabkan gaya kontak yang antara batang dan beton di sekitarnya. Tegangan pada permukaan batang yang dihasilkan dari komponen gaya searah batang dapat dianggap sebagai tegangan lekatan antara batang dan beton.

Sifat lekatan batang FRP telah diselidiki secara luas oleh banyak peneliti melalui berbagai jenis tes, seperti tes cabut, tes splais, dan balok kantilever, dalam menentukan persamaan empiris untuk panjang pemasangan (Faza dan GangaRao 1990; Ehsani et al. 1996a, b; Benmokrane 1997; Shield et al. 1999; Mosley 2002; Wambeke dan Shield 2006; Tighiouart et al. 1999).

## 4.3 Perilaku berdasarkan fungsi waktu

### 4.3.1 Keruntuhan rangkak

Serat FRP yang mengalami tegangan konstan dari waktu ke waktu dapat tiba-tiba gagal setelah periode waktu yang disebut waktu ketahanan. Fenomena ini dikenal sebagai keruntuhan rangkak atau fatik statis. Keruntuhan rangkak tidak menjadi masalah pada batang baja di beton bertulang kecuali pada suhu yang sangat tinggi, seperti kondisi terpapar api. Ketika rasio tegangan tarik yang berkelanjutan terhadap kekuatan jangka pendek dari batang FRP meningkat, waktu ketahanan berkurang. Waktu ketahanan keruntuhan rangkak juga dapat berkurang secara permanen dalam kondisi lingkungan yang cukup merusak seperti suhu tinggi, paparan radiasi ultraviolet, alkalinitas tinggi, siklus basah dan kering, atau siklus pembekuan dan pencairan. Literatur tentang efek dari lingkungan tersebut ada, walaupun intisari dari kriteria umum terhambat oleh kurangnya standar dan pelaporan tes rangkak serta beragamnya unsur-unsur yang digunakan oleh suatu proses yang digunakan untuk membuat produk-produk FRP khusus. Selain itu, sedikitnya data yang tersedia untuk waktu ketahanan lebih dari 100 jam. Faktor-faktor menghasilkan kriteria desain yang konservatif sampai penelitian lebih lanjut telah dilakukan pada subjek ini. Beberapa contoh kasus

representatif dari waktu ketahanan untuk batang dan material seperti batang, namun tidak ada data regangan rangkai yang tersedia dalam kasus ini.

Secara umum, serat karbon adalah yang paling tidak rentan terhadap retakan rangkai, sedangkan serat aramid cukup rentan, dan serat gelas adalah yang paling rentan. Serangkaian tes keruntuhan rangkai komprehensif telah dilakukan untuk batang FRP berdiameter 6 mm yang diperkuat dengan gelas, aramid, dan serat karbon (Yamaguchi et al. 1997). Batang diuji pada tingkat beban yang berbeda pada suhu kamar dalam kondisi laboratorium menggunakan angkur berbentuk kerucut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat hubungan linear antara kekuatan rangkai pecah dan hubungan logaritmik untuk waktu hingga 100 jam. Rasio tingkat tegangan pada keruntuhan rangkai dengan kekuatan awal GFRP, AFRP, dan CFRP setelah 500.000 jam (lebih dari 50 tahun) secara linear diekstrapolasi masing-masing menjadi 0,29, 0,47, dan 0,93.

Dalam penyelidikan lainnya, waktu ketahanan ditentukan untuk batang AFRP yang dikepang dan batang CFRP yang dipilin, keduanya menggunakan resin epoksi sebagai bahan matriks (Ando et al. 1997). Batang komersial ini diuji pada suhu kamar dalam kondisi laboratorium dan diangkur dengan grout semen ekspansif di dalam pegangan bertipe gesekan. Diameter batang berkisar antara 5 hingga 15 mm, tetapi variasi ini tidak mempengaruhi hasil pengujian. Rasio tingkat tegangan pada rangkai pecah dengan kekuatan awal setelah 50 tahun dihitung menggunakan hubungan linear yang diekstrapolasi dari data yang tersedia hingga 100 jam ditemukan 0,79 untuk CFRP dan 0,66 untuk AFRP.

Investigasi keruntuhan rangkai pada batang GFRP dalam kondisi laboratorium suhu kamar dilakukan oleh Seki et al. (1997). Batang *E-Glass* vinil ester yang dicetak memiliki penampang persegi panjang dan tab GFRP kecil [4,4 mm<sup>2</sup>]. Nilai persentase kekuatan tarik awal dipertahankan mengikuti hubungan linear terhadap waktu dalam skala logaritmik, mencapai nilai 55 persen pada waktu daya tahan 50 tahun yang diekstrapolasi.

Karakteristik data keruntuhan rangkai dari untaian terpilin CFRP komersial berdiameter 12,5 mm di lingkungan dalam ruangan tersedia (Tokyo Rope 2000). Kekuatan pecah pada waktu ketahanan proyeksi 100 tahun sebesar 85 persen dari kekuatan awal.

Investigasi deformasi rangkai (tidak pecah) dalam satu AFRP komersial dan dua batang CFRP komersial diuji hingga 3000 jam telah dilakukan (Saadatmanesh dan Tannous 1999a, b). Batang diuji di kondisi laboratorium dan dalam larutan suhu ruangan dengan pH sama dengan 3 dan 12. Batang memiliki diameter antara 8 mm hingga 10 mm, dan tegangan yang diaplikasikan konstan sebesar 40 persen dari kekuatan awal. Hasilnya menunjukkan bahwa terdapat sedikit kecenderungan ke arah tegangan rangkai yang lebih tinggi pada batang berdiameter lebih besar dan pada batang yang direndam dalam larutan asam. Batang yang diuji di udara memiliki regangan rangkai terendah dari tiga lingkungan. Mempertimbangkan kondisi lingkungan dan bahan pengujian, kisaran regangan yang direkam setelah 3000 jam adalah 0,002 persen hingga 0,037 persen. Regangan rangkai sedikit lebih tinggi pada batang AFRP daripada di batang CFRP.

Untuk proses karakterisasi eksperimental keruntuhan rangkai, dapat mengacu pada metode uji yang diusulkan oleh *Japan Society of Civil Engineers* (1997b). Karakteristik rangkai dari batang FRP juga dapat ditentukan dari metode uji tarik yang dikutip dalam ACI 440.3R. Rekomendasi mengenai batas tegangan tetap yang diaplikasikan untuk menghindari keruntuhan rangkai disediakan pada Pasal 7.4.

#### 4.3.2 Fatik

Terdapat sejumlah data untuk mengetahui perilaku fatik dan prediksi siklus hidup bahan FRP (National Research Council 1991; Wicaksono dan Chai 2013). Selama periode waktu ini, fokus

## SNI 8970:2021

penelitian adalah untuk mengetahui bahan yang cocok untuk aplikasi luar angkasa. Beberapa pengamatan tentang perilaku fatik bahan FRP dapat dilakukan, meskipun sebagian besar data diperoleh dari spesimen FRP yang dimaksudkan untuk aplikasi luar angkasa bukan untuk konstruksi. Kecuali dinyatakan sebaliknya, kasus-kasus ini didasarkan pada searah dengan 60 persen fraksi volume serat dan dibebani tegangan-tegangan siklik sinusoidal pada frekuensi yang cukup rendah sehingga tidak menyebabkan kenaikan temperatur, lingkungan laboratorium, rasio tegangan (rasio tegangan minimum yang diterapkan terhadap tegangan maksimum yang diterapkan) senilai 0,1, dan arah yang sejajar dengan serat utama.

Kondisi pengujian yang mengakibatkan kenaikan suhu dan kadar air bahan FRP umumnya menurunkan perilaku kelelahan/fatik.

Dari semua jenis komposit FRP yang saat ini tersedia untuk aplikasi infrastruktur, CFRP umumnya dianggap paling rentan terhadap kegagalan fatik. Pada plot tegangan versus logaritma dari jumlah siklus pada kegagalan (kurva S-N), kemiringan gradien CFRP ke arah bawah rata-rata biasanya sekitar 5 persen hingga 8 persen dari kekuatan statis awal per dekade logaritmik siklus hidup. Pada 1 juta siklus, kekuatan fatik umumnya berada antara 50 persen dan 70 persen dari kekuatan statis awal dan relatif tidak terpengaruh oleh kelembapan dan paparan suhu beton kecuali resin atau serat/antarmuka resin terdegradasi secara substansial oleh lingkungan. Beberapa laporan data hingga 10 juta siklus mengindikasikan tren penurunan yang terus-menerus dari 5 persen hingga 8 persen per dekade dalam kurva S-N (Curtis 1989).

Serat gelas, seperti *E-Glass* dan *S-Glass*, umumnya tidak rentan terhadap kegagalan fatik. Namun, serat gelas individu telah menunjukkan kegagalan tertunda yang disebabkan oleh korosi tegangan yang disebabkan oleh terjadinya cacat permukaan dengan adanya jumlah uap air yang sangat kecil dalam uji lingkungan laboratorium (Mandell dan Meier 1983). Ketika banyak serat gelas terkandung dalam matriks untuk membentuk komposit FRP, efek fatik siklik mengakibatkan sekitar 10 persen kehilangan dalam kapasitas statis awal per dekade masa logaritmik teramati (Mandell 1982). Efek fatik ini diduga terjadi karena interaksi serat-serat dan tidak bergantung pada mekanisme korosi tegangan untuk masing-masing serat individu. Tidak ada batas fatik yang jelas yang dapat ditentukan. Faktor-faktor lingkungan berperan penting dalam menentukan perilaku fatik serat gelas karena rentannya terhadap kelembapan, alkali, dan larutan asam.

Serat aramid, di mana data durabilitasnya tersedia, memiliki perilaku untuk menahan fatik serupa dengan serat karbon dan gelas. Perilaku fatik tegangan tarik-tegangan tarik batang serat aramid terimpregnasi sangat baik. Degradasi kekuatan per dekade masa hidup logaritmik berkisar 5 persen hingga 6 persen (Roylance dan Roylance 1981). Sementara tidak ada batas daya tahan yang berbeda yang diketahui untuk AFRP, 2 juta kekuatan fatik siklus dari batang AFRP komersial untuk aplikasi beton telah dilaporkan dalam kisaran 54 persen hingga 73 persen dari kekuatan bilah awal (Odagiri et al. 1997). Berdasarkan temuan ini, Odagiri et al. (1997) menyarankan bahwa tegangan maksimum ditetapkan pada 54 persen hingga 73 persen dari kekuatan tarik awal. Karena kemiringan gradien kurva tegangan yang diaplikasikan versus waktu rangkai-pecah logaritmik dari AFRP sama dengan kemiringan tegangan dibandingkan data seumur hidup siklik logaritmik, serat-serat individu dianggap gagal oleh proses pecah-rangkai yang terbatas pada regangan. Kondisi kegagalan ini dipercepat oleh paparan kelembapan dan suhu yang meningkat. (Roylance dan Roylance 1981; Rostasy 1997).

Meskipun pengaruh kelembapan pada perilaku fatik bahan FRP searah umumnya dianggap merugikan jika resin atau antarmuka serat/matriks terdegradasi, temuan dari hasil penelitian tidak dapat disimpulkan Karena kinerjanya bergantung pada jenis serat dan matriks, metode prekondisi, konten larutan, serta kondisi lingkungan selama fatik (Hayes et al. 1998; Rahman

et al. 1997). Selain itu, faktor-faktor seperti pencengkeraman dan adanya beton yang mengelilingi batang selama uji fatik perlu dipertimbangkan.

Kekuatan fatik batang CFRP yang dikelilingi dalam beton diamati berkurang ketika suhu lingkungan meningkat dari 20 °C hingga 40 °C (Adimi et al.) Dalam penyelidikan ini, ditemukan bahwa batas daya tahan berbanding terbalik dengan frekuensi pembebanan. Juga ditemukan bahwa frekuensi pembebanan siklik yang lebih tinggi dalam kisaran 0,5 Hz sampai 8 Hz berkorelasi dengan suhu batang yang lebih tinggi karena gesekan. Dengan demikian, batas daya tahan pada pembebanan dengan frekuensi 1 Hz bisa lebih dari 10 kali dari pada 5 Hz. Dalam penyelidikan yang dikutip, rasio tegangan (tegangan minimum dibagi dengan tegangan maksimum) 0,1 dan tegangan maksimum 50 persen dari kekuatan awal menghasilkan kegagalan kapasitas lebih besar dari 400.000 siklus ketika frekuensi pemuatan adalah 0,5 Hz. Spesimen ini tidak memiliki kehilangan kekuatan tarik residual.

Dengan batang CFRP, batas daya tahan juga tergantung pada tegangan rata-rata dan rasio tegangan siklik maksimum-minimum. Tegangan rata-rata yang lebih tinggi atau rasio *stress* yang lebih rendah (minimum dibagi dengan maksimum) akan menyebabkan pengurangan kapasitas batas daya tahan (Rahman dan Kingsley 1996; Saadatmanesh dan Tannous 1999a).

Meskipun GFRP lebih lemah dari baja untuk menahan geser, uji kelelahan pada spesimen dengan batang dowel GFRP tidak terikat menunjukkan perilaku fatik yang serupa dengan batang baja dowel untuk beban geser transversal siklik hingga 10 juta siklus. Hasil pengujian dan perhitungan kekakuan menunjukkan bahwa kinerja yang setara dapat dicapai antara FRP dan batang baja yang mengalami geser melintang dengan mengubah beberapa parameter, seperti diameter, jarak, ataupun keduanya (Porter et al. 1993; Hughes dan Porter 1996).

Penambahan rusuk (*ribs*), lilitan (*wrap*), dan jenis deformasi lainnya dapat meningkatkan perilaku lekatan batang FRP. Namun, deformasi telah terbukti memicu terjadinya konsentrasi tegangan lokal yang secara signifikan yang dapat mempengaruhi kinerja batang GFRP dalam situasi pembebanan fatik (Katz 1998). Konsentrasi tegangan lokal dapat menurunkan kinerja fatik dengan memberikan tegangan multi-aksial yang berfungsi untuk meningkatkan mekanisme kerusakan yang didominasi oleh matriks yang biasanya ditekan dalam bahan komposit yang didominasi serat. Mekanisme kerusakan tambahan yang didominasi oleh serat dapat juga terjadi di dekat deformasi, tergantung pada konstruksi batang.

Efek fatik pada lekatan batang ulir GFRP yang tertanam dalam beton telah diselidiki secara rinci menggunakan tes/uji lekatan khusus (Sippel dan Mayer 1996; Nanni et al. 1998a; Katz 2000). Bahan GFRP yang berbeda, lingkungan, serta metode pengujian diikuti dalam setiap kasus yang dikutip, menunjukkan hasil bahwa kekuatan lekatan dapat meningkat, berkurang, atau tetap sama setelah pembebanan siklik. Perilaku fatik lekatan belum diselidiki secara memadai hingga saat ini, sehingga direkomendasikan untuk melakukan desain konservatif berdasarkan bahan tertentu dan kondisi eksperimental.

Batasan desain pada rentang tegangan fatik untuk batang FRP tergantung pada proses pembuatan batang FRP, kondisi lingkungan, serta jenis beban fatik yang diterapkan. Mengingat perkembangan yang sedang berlangsung dalam proses pembuatan batang FRP, kriteria desain konservatif harus digunakan untuk semua batang FRP yang tersedia secara komersial. Kriteria desain diberikan dalam 7.4.2.

Berkaitan dengan karakteristik fatik batang FRP, perencana dapat mengacu pada metode uji standar sementara yang terkandung dalam ACI 440.3R. Perencana harus selalu berkonsultasi dengan produsen batang untuk mengetahui sifat respons fatik.

#### 4.4 Efek dari api dan temperatur tinggi

Ketahanan terhadap api dari elemen lentur beton bertulang FRP dapat mempertimbangkan perbedaan yang mungkin terjadi dalam responsnya terhadap pemanasan, yang dimana ditentukan dengan cara yang sama seperti pada pelat beton bertulang baja konvensional (ACI 216.1). Efek dari paparan suhu tinggi pada kapasitas geser dan tekan aksial elemen beton bertulang FRP tidak diketahui dengan baik, sehingga penelitian tambahan diperlukan.

Jenis penulangan, tipe agregat, serta ketebalan selimut beton akan mempengaruhi kinerja terhadap api elemen struktural yang diperkuat FRP. Jenis batang penting karena semua bahan FRP akan mengalami degradasi yang sangat berbeda dalam sifat mekanis dan lekatan pada suhu tinggi (Bisby et al. 2005). Jenis agregat dan selimut beton penting karena dua parameter ini secara signifikan mempengaruhi perpindahan panas ke penulangan dan juga suhu yang dialami selama paparan api baik di batang di sepanjang zona terbuka dan di zona angkur (Kodur dan Bisby 2005; Nigro et al. 2011b).

##### 4.4.1 Transfer panas

Penelitian telah menunjukkan bahwa perilaku perpindahan panas dari pelat dan balok beton bertulang yang diperkuat FRP serupa dengan yang diperkuat dengan batang baja. (Kodur dan Bisby 2005; Nigro et al. 2011b)

##### 4.4.2 Degradasi material

Karena bahan FRP lebih sensitif daripada batang baja terhadap suhu tinggi, jenis batang memengaruhi ketahanan api elemen beton bertulang FRP; elemen tersebut mungkin memiliki tahanan api dibandingkan dengan elemen yang diperkuat baja suhu yang setara (Bisby dan Kodur 2007). Karena batang FRP tertanam di dalam beton, batang tidak berkontribusi signifikan terhadap tingkat keparahan api atau toksisitas; namun, ketahanan api dari bagian beton bertulang FRP bisa lebih kecil dari pada bagian yang diperkuat baja karena pengurangan sifat mekanik FRP, hilangnya lekatan dari fenomena pelunakan resin pada batang, atau keduanya.

##### 4.4.3 Batas kemampuan layan

Sifat polimer pada permukaan batang sangat penting dalam menjaga lekatan antara FRP dengan beton. Pada suhu yang mendekati suhu transisi gelas  $T_g$ , sifat mekanik polimer mulai berkurang dan polimer menjadi kurang mampu dalam mentransfer tegangan dari beton ke serat, mengakibatkan pengurangan kekuatan lekatan yang cukup besar (Katz et al. 1999; Nigro et al. 2012). Nilai  $T_g$  tergantung pada jenis resin, tetapi biasanya berkisar antara 93 °C hingga 120 °C untuk resin yang digunakan di sebagian besar batang FRP untuk struktur beton. Serat, yang umumnya digunakan untuk serat gelas dan karbon menunjukkan sifat termal yang lebih baik daripada resin dengan titik leleh 880 °C untuk serat gelas dan 1600 °C untuk karbon, yang dapat terus menahan beban ke arah longitudinal; Namun, kekuatan tarik dan kekakuan komposit FRP keseluruhan berkurang karena pengurangan transfer gaya antara serat melalui lekatan ke resin (Chowdhury et al. 2011). Pengurangan kekakuan umumnya diprediksi setelah pengurangan kekuatan. Suhu transisi gelas onset, yang diperoleh dengan pengujian analisis mekanis dinamis (DMA), umumnya tidak boleh terlampaui untuk memastikan terjaganya sifat mekanik dan lekatan dari batang FRP.

##### 4.4.4 Batas kondisi ultimit

Jika panjang pengankuran FRP tetap berada di luar area yang terkena suhu tinggi selama terjadi kebakaran, kehilangan lekatan di zona panas bersifat tidak kritis, karena serat bersifat

kurang sensitif terhadap suhu yang meningkat. Oleh karena itu, batang FRP yang terangkur dengan baik dapat mempertahankan kekuatan dan kekakuan yang cukup besar pada suhu di atas  $T_g$ . Sebagai contoh, Robert dan Benmokrane (2010) menunjukkan bahwa batang GFRP terangkur baik dengan  $T_g$  120 °C dapat mempertahankan hingga 50 persen dari kekuatan tarik pada suhu melebihi 300 °C; Maluk et al. (2011) menunjukkan bahwa batang CFRP terangkur baik dengan  $T_g$  121 °C mempertahankan sebanyak 65 persen dari kekuatan tarik pada suhu melebihi 330 °C.

#### 4.4.5 Desain struktural tahan api

Faktor beban dan tahanan yang terjadi, serta kriteria defleksi dan lebar retak untuk kemampuan layan yang digunakan selama proses desain, juga akan memengaruhi kinerja kebakaran. Perbedaan dalam falsafah desain antara tata cara desain dan kode untuk beton bertulang baja (yang biasanya ditentukan oleh kekuatan), jika dibandingkan dengan beton bertulang FRP (yang sering ditentukan oleh kriteria kemampuan layan), menunjukkan bahwa ketika terpapar api, kapasitas lentur elemen yang diperkuat FRP mungkin secara tersirat memiliki kekuatan cadangan yang jauh lebih besar. Masalah ini dibahas secara rinci oleh Bisby dan Kodur (2007).

Dengan adanya isu-isu tersebut di atas, desain elemen beton bertulang FRP yang rasional untuk keselamatan kebakaran harus dilakukan dengan pemahaman yang jelas tentang kriteria ketahanan api struktural yang sesuai untuk bangunan. Perencana harus memperhitungkan pengurangan kapasitas yang disebabkan oleh suhu pada lekatan antara balok FRP dan beton; perlu diperhatikan bahwa pengurangan kekuatan lekatan biasanya tidak dianggap penting untuk desain tahan api dengan batang baja ulir konvensional. Pendekatan umum untuk pengujian ketahanan api yang diberikan oleh ASTM E119 direkomendasikan. Ketika melakukan uji kebakaran menggunakan ASTM E119 untuk komponen beton bertulang FRP, pendekatan suhu kritis tidak boleh diambil untuk batang FRP kecuali jika pertimbangan rasional kinerja elemen menyeluruh dalam kebakaran telah dilakukan dan telah mencapai definisi suhu kritis. Dalam banyak kasus, elemen beton harus diuji dalam kondisi dibebani dan ketahanan api harus ditentukan berdasarkan persyaratan kekuatan dan defleksi daripada suhu di FRP. Integritas struktural yang relevan dan kriteria isolasi tahan api masih berlaku (ACI 216.1).

Beberapa tes skala besar telah dilakukan sesuai dengan ASTM E119, CAN / ULC S101-M89, DIN EN 1363 (Deutsches Institut für Normung e.V. 2012), dan peraturan ISO 834-1 telah dilakukan pada balok dan pelat yang diperkuat dengan GFRP dan CFRP (Nigro et al. 2011a, 2013). Pengujian ini telah menunjukkan penilaian kriteria ketahanan api struktural untuk elemen beton bertulang FRP lebih dari 3 jam untuk kasus di mana batang FRP terangkur dengan baik pada daerah dingin elemen beton. Misalnya, Nigro et al. (2013) menunjukkan bahwa pelat beton yang tertumpu sederhana yang diperkuat dengan batang GFRP yang terangkur dengan baik (dengan  $T_g$  100 °C dan selimut beton yang berukuran 25,4 mm mampu mempertahankan 60 persen dari kekuatan ultimit desainnya selama lebih dari 3 jam terhadap paparan api sesuai standar ISO 834. Temperatur batang melebihi 500 °C; Namun, batang dapat terus menahan beban karena adanya detail angkur yang efektif.

## 5 Durabilitas

Kekuatan dan kekakuan batang FRP rentan terhadap perubahan lingkungan sebelum, selama dan setelah pelaksanaan. Perubahan lingkungan ini dapat mencakup air, paparan ultraviolet, peningkatan suhu, larutan alkali atau asam, dan larutan garam. Kekuatan dan kekakuan dapat meningkat, menurun, atau tetap sama, tergantung pada bahan dan kondisi paparan tertentu. Sifat tarik dan lekatan batang FRP adalah parameter utama untuk pelaksanaan beton bertulang.

## 5.1 Uji durabilitas yang dipercepat

Kondisi lingkungan yang paling menarik perhatian para peneliti terkait dengan batang FRP adalah air pori yang sangat basa yang ditemukan pada struktur beton di luar ruangan. (Gerritse 1992; Takewaka dan Khin 1996; Rostasy 1997; Yamaguchi et al. 1997). Metode yang secara sistematis mempercepat penurunan kekuatan filamen gelas polos, tanpa tekanan, di dalam beton dengan menggunakan suhu telah berhasil (Litherland et al. 1981) dan juga sering diaplikasikan pada material *Glass FRP* (GFRP) untuk memprediksi kinerja jangka panjang dalam larutan alkali. Metode uji untuk mengevaluasi daya tahan batang FRP dalam larutan alkali disajikan dalam ASTM D7705. Tidak ada pembuktian hingga saat ini, bahwa metode yang dipercepat untuk gelas polos (hanya satu reaksi kimia yang mengendalikan degradasi) berlaku untuk GFRP komposit (beberapa reaksi dan mekanisme degradasi dapat diaktifkan sekaligus atau berurutan). Selain itu, efek dari tegangan yang diberikan selama paparan harus diperhitungkan juga. Karena data yang tidak mencukupi tentang pengaruh cuaca gabungan dan tegangan yang bekerja, diskusi tentang pengaruh cuaca, rangkai, dan kelelahan (*fatigue*) dipisahkan dalam tata cara ini. Oleh karena itu, sementara percobaan jangka pendek menggunakan lingkungan agresif memungkinkan perbandingan bahan secara cepat, ekstrapolasi hasil terhadap kondisi lapangan dan perkiraan umur layan tidak mungkin tanpa adanya data real-time (Barkatt et al. 1998; Clarke dan Sheard 1998). Dalam kebanyakan kasus hingga saat ini, tulangan polos terpapar lingkungan agresif tanpa beban. Hubungan antara data pada tulangan polos dan data pada tulangan yang tertanam dalam beton dipengaruhi oleh variabel tambahan, seperti tingkat perlindungan yang diberikan beton pada tulangan (Clarke dan Sheard 1998; Scheibe dan Rostasy 1998; Sen et al. 1998a, b). Waktu tes biasanya dalam kisaran 10 hingga 30 bulan.

## 5.2 Durabilitas batang FRP

Karena banyaknya literatur tentang hal ini (Benmokrane dan Rahman 1998) dan terbatasnya spasi di standar ini, beberapa generalisasi harus dilakukan dengan menyajikan hasil kuantitatif tertentu saja. Dengan batasan ini, hasil eksperimen yang representatif untuk berbagai material batang FRP dan kondisi pengujian ditinjau secara balans pada bagian ini. Pemikiran yang konservatif disarankan dalam menerapkan hasil ini dalam desain hingga data tambahan terkait daya tahan jangka panjang tersedia.

### 5.2.1 Larutan alkali

Larutan dengan nilai pH tinggi bervariasi dari 11,5 hingga 13,0 diketahui dapat menurunkan kekuatan tarik dan kekakuan batang GFRP (Porter dan Barnes 1998). Namun, hasil-hasilnya sangat bervariasi tergantung dengan perbedaan dalam metode pengujian, selain pH, juga komposisi larutan kimia, suhu, dan keberadaan beban. Suhu yang lebih tinggi dan waktu paparan yang lebih lama memperburuk masalah. Sebagian besar data telah dihasilkan dengan menggunakan suhu serendah mungkin sedikit dibawah titik beku dan setinggi beberapa derajat di bawah  $T_g$  resin. Sejauh mana resin melindungi serat gelas dari difusi ion hidroksil yang merusak ( $\text{OH}^-$ ) ditunjukkan dengan angka yang jelas dalam ketahanan alkali dari batang GFRP (Bank dan Puterman 1997; Coomarasamy dan Goodman 1997; GangaRao dan Vijay 1997b; Porter et al. 1997; Bakis et al. 1998; Tannous dan Saadatmanesh 1999; Uomoto 2000). Sebagian besar peneliti percaya bahwa resin vinil ester memiliki ketahanan yang unggul terhadap masuknya uap air dibandingkan dengan komoditas resin lainnya. Jenis serat gelas juga tampaknya menjadi faktor penting dalam ketahanan alkali batang GFRP (Devalapura et al. 1996). Penelitian yang memeriksa daya tahan berbagai produk berbasis serat gelas, termasuk batang GFRP Amerika Utara, telah dilakukan oleh beberapa peneliti (Robert dan Benmokrane 2013; Belarbi dan Wang 2012; Kamal dan Boulfiza 2011; Robert et al. 2009; Chen et al. 2007). Rentang pengurangan kekuatan tarik di batang GFRP dimulai dari 0 persen hingga 75 persen dari nilai awal telah dilaporkan dalam literatur yang dikutip. Dalam

banyak kasus, pengurangan kekakuan tarik dalam batang GFRP yang bertegangan dan tanpa tegangan berkisar antara 0 persen dan 20 persen. Kekuatan tarik dan kekakuan batang aramid FRP (AFRP) dalam larutan alkali suhu tinggi, baik dengan atau tanpa tegangan tarik, masing-masing dilaporkan menurun antara 10 persen dan 50 persen dan 0 persen dan 20 persen dari nilai awal (Takewaka dan Khin 1996; Rostasy 1997; Sen pada al. 1998b). Dalam kasus FRP karbon tanpa tegangan (CFRP), kekuatan dan kekakuan telah dilaporkan penurunan antara 0 persen dan 20 persen (Takewaka dan Khin 1996).

### 5.2.2 Radiasi ultraviolet dan kelembapan

Paparan terhadap batang FRP pada sinar ultraviolet dan uap air sebelum penempatannya pada beton sangat mempengaruhi kekuatan tariknya karena degradasi konstituen polimer, termasuk serat aramid dan semua resin. Praktik pelaksanaan dan penambahan aditif resin yang tepat dapat mengurangi masalah pengaruh cuaca jenis ini secara signifikan. Sangat direkomendasikan bahwa, sebelum ditempatkan di beton, batang FRP dilindungi dari paparan langsung terhadap sinar matahari dan kelembapan. Beberapa hasil dari uji paparan gabungan antara ultraviolet dan kelembapan dengan dan tanpa tegangan yang diterapkan pada batang telah menunjukkan pengurangan kekuatan tarik dari 0 persen hingga 20 persen dari nilai awal pada CFRP, 0 persen hingga 30 persen pada AFRP, dan 0 persen hingga 40 persen pada GFRP (Sasaki et al. 1997; Uomoto 2000). Sebuah studi ekstensif batang GFRP, AFRP, dan CFRP yang disimpan di luar ruangan dalam rak dekat laut tidak menunjukkan perubahan kekuatan tarik atau modulus yang signifikan dari seluruh batang (Tomosawa dan Nakatsuji 1996, 1997).

### 5.2.3 Larutan garam

Telah ditunjukkan (Rahman et al. 1996) bahwa penambahan berbagai jenis garam ke dalam larutan yang mana batang FRP dicelupkan tidak serta merta membuat perbedaan yang signifikan dalam kekuatan dan kekakuan pada batang FRP jika dibandingkan dengan yang ada dalam larutan tanpa garam. Namun, sebagian besar studi tidak memisahkan efek air dan garam yang ditambahkan ke air. Satu studi menemukan penurunan 0 persen sampai 20 persen dari kekuatan tarik awal di batang GFRP yang mengalami larutan garam pada suhu kamar dan siklus beku-dan-cair (Vijay dan GangaRao 1999); yang lain menemukan pengurangan 15 persen pada kekuatan batang AFRP di lingkungan laut (Sen et al. 1998b).

## 5.3 Durabilitas lekatan antara FRP dan beton

Studi tentang durabilitas lekatan antara FRP dan beton sebagian besar berkaitan dengan lingkungan yang lembap dan basa yang ditemukan dalam beton. Lekatan penulangan FRP bergantung pada pemindahan gaya geser dan transversal pada pertemuan antara batang dan beton, dan antara serat individu di dalam batang. Mekanisme yang didominasi resin ini berbeda dengan mekanisme yang didominasi serat yang mengontrol sifat seperti kekuatan longitudinal dan kekakuan batang FRP. Oleh karena itu, lingkungan yang menurunkan kekuatan polimer resin atau *interface* serat/resin juga cenderung menurunkan kekuatan lekatan batang FRP.

Berbagai metode uji lekatan (uji tarikan, uji tension, dan uji *beam-end*) telah diusulkan untuk batang FRP, meskipun uji tarikan langsung telah menjadi yang paling populer karena kesederhanaannya dan biaya yang rendah walaupun tidak mampu mewakili keadaan tegangan beton dalam sebagian besar situasi praktis (Nanni et al. 1995; Tepfers 2002). Spesimen cabut dengan batang CFRP dan GFRP telah mengalami paparan lingkungan alami dan belum menunjukkan penurunan kekuatan lekatan yang signifikan selama periode waktu antara 1 tahun dan 2 tahun (Clarke dan Sheard 1998; Sen et al. 1998a). Tren positif dan negatif dalam kekuatan cabut sehubungan dengan periode waktu yang lebih pendek telah diperoleh dengan batang GFRP yang mengalami lingkungan suhu tinggi basah dalam beton, dengan

atau tanpa penambahan alkalinitas (Al-Dulaijan et al. 1996; Bakis et al. 1998; Bank et al. 1998; Porter dan Barnes 1998). Pengamatan serupa pada tes cabut seperti itu menggunakan spesimen yang mengalami percepatan paparan lingkungan yang diberikan pada batang AFRP dan CFRP (Conrad et al. 1998). Retak memanjang pada selimut beton dapat secara serius menurunkan kemampuan lekatan batang FRP, dan langkah-langkah yang cukup harus diambil untuk mencegah retak seperti itu dalam uji laboratorium dan aplikasi lapangan (Sen et al. 1998a). Kemampuan senyawa kimia untuk lewat melalui beton menuju batang FRP adalah faktor penting lain yang diduga mempengaruhi kekuatan lekatan (Porter dan Barnes 1998).

## **6 Pertimbangan umum desain**

Rekomendasi desain umum untuk elemen beton lentur yang diperkuat menggunakan batang FRP disajikan dalam Pasal ini. Rekomendasi didasarkan pada prinsip keseimbangan dan kompatibilitas, dan hukum konstitutif material. Selain itu, pada desain pola keruntuhan lentur baik yang dikontrol tekan atau tarik dapat dipertimbangkan karena adanya sifat getas dari penulangan FRP dan beton. Efek suhu tinggi dan kebakaran pada struktur yang menggunakan tulangan FRP dibahas dalam 4.4.

### **6.1 Falsafah desain**

Meskipun pendekatan desain kekuatan dan desain tegangan kerja dipertimbangkan, pendekatan desain kekuatan komponen beton bertulang yang menggunakan tulangan batang FRP lebih disukai untuk memastikan konsistensi dengan dokumen ACI lainnya. Rekomendasi desain didasarkan pada prinsip-prinsip desain batas. Dalam banyak kasus, kriteria kemampuan layan atau batas ketahanan fatik dan keruntuhan rangkai dapat mengontrol desain bagian beton yang menggunakan tulangan lentur dengan batang FRP, terutama FRP Aramid (AFRP) dan FRP Gelas (GFRP) yang menunjukkan kekakuan rendah.

Faktor beban yang diberikan dalam ACI 318 digunakan untuk menentukan kekuatan yang diperlukan dari bagian beton yang menggunakan tulangan FRP.

### **6.2 Sifat material untuk desain**

Sifat material yang disediakan oleh pabrikan, seperti kekuatan tarik yang terjamin, harus dipertimbangkan sebagai sifat awal yang tidak termasuk efek paparan lingkungan jangka panjang. Karena paparan jangka panjang untuk berbagai jenis lingkungan dapat mengurangi kekuatan tarik dan keruntuhan rangkai dan ketahanan fatik batang FRP, sifat material yang digunakan dalam persamaan desain harus dikurangi berdasarkan pada jenis dan tingkat paparan lingkungan.

Persamaan (6.2a) dan (6.2b) memberikan sifat tarik yang harus digunakan dalam semua persamaan desain. Kekuatan tarik desain harus ditentukan oleh

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \tag{6.2a}$$

Regangan runtuh desain harus ditentukan sebagai

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \tag{6.2b}$$

Modulus elastisitas desain akan sama dengan nilai yang dilaporkan oleh pabrikan sebagai modulus elastisitas rata-rata (nilai terjamin) dari sampel spesimen uji ( $E_f = E_{f,ave}$ ).

Faktor reduksi lingkungan yang diberikan pada Tabel 6.2 adalah perkiraan konservatif, tergantung pada daya tahan masing-masing jenis serat, dan didasarkan pada konsensus

Komite ACI 440. Efek suhu termasuk dalam nilai  $C_E$ . Namun, batang FRP sebaiknya tidak digunakan di lingkungan dengan suhu layan lebih tinggi dari  $T_g$  resin yang digunakan untuk pembuatannya.

**Tabel 6.2 – Faktor reduksi lingkungan untuk beragam serat dan kondisi paparan**

Kondisi paparan	Tipe Serat	Faktor reduksi lingkungan $C_E$
Beton tidak terpapar tanah dan cuaca	Karbon	1,0
	Gelas	0,8
	Aramid	0,9
Beton terpapar tanah dan cuaca	Karbon	0,9
	Gelas	0,7
	Aramid	0,8

Diharapkan bahwa dengan penelitian lanjutan, nilai-nilai ini akan menjadi lebih mencerminkan efek aktual lingkungan. Metodologi mengenai penggunaan faktor-faktor ini, diharapkan tidak berubah.

### 6.2.1 Kekuatan tarik FRP saat lentur

Kekuatan tarik desain batang FRP saat lentur dapat ditentukan sebagai

$$f_{fb} = \left( 0,05 \cdot \frac{r_b}{d_b} + 0,3 \right) f_{fu} \leq f_{fu} \quad (6.2.1)$$

Persamaan (6.2.1) diadaptasi dari rekomendasi desain oleh *Japan Society of Civil Engineers* (1997b). Penelitian terbatas pada kait FRP (Ehsani et al. 1995) menunjukkan bahwa gaya tarik yang dikembangkan oleh bagian bengkok dari batang GFRP terutama dipengaruhi oleh rasio jari-jari bengkokan terhadap diameter batang,  $r_b/d_b$ ; panjang ekor; dan kekuatan beton paling sedikit berpengaruh.

Untuk penentuan alternatif pengurangan kekuatan tarik akibat lentur, pabrikan pembuat batang bengkok dapat memberikan hasil pengujian berdasarkan pada metodologi pengujian yang dikutip dalam ACI 440.3R.

## 7 Lentur

Desain beton bertulang FRP untuk lentur serupa dengan desain beton dengan tulangan baja. Data eksperimental pada bagian beton yang menggunakan tulangan batang FRP menunjukkan bahwa kapasitas lentur dapat dihitung berdasarkan asumsi yang sama dengan yang dibuat untuk komponen yang menggunakan tulangan batang baja (Faza dan GangaRao 1993a; Nanni 1993b; GangaRao dan Vijay 1997a). Desain komponen yang diperkuat dengan batang FRP harus memperhitungkan hubungan tegangan-regangan uniaksial dari bahan FRP.

## **7.1 Pertimbangan umum**

Pasal ini secara khusus membahas penampang elemen persegi panjang dengan satu lapisan dari satu jenis penulangan FRP tarik, karena contoh eksperimental hampir secara eksklusif menggunakan komponen berbentuk penampang persegi dan tata letak tulangan ini. Konsep yang dijelaskan di sini, bagaimanapun juga dapat diterapkan pada analisis dan desain komponen elemen dengan penulangan FRP dengan geometri dan jenis yang berbeda, banyak lapisan, atau kombinasi dari keduanya. Meskipun tidak ada bukti bahwa teori lentur, seperti yang dikembangkan di sini, tidak berlaku sama baiknya untuk penampang nonpersegi, perilaku penampang nonpersegi perlu dilakukan penelitian lanjut.

### **7.1.1 Falsafah desain lentur**

Penampang beton bertulang umumnya dirancang untuk memastikan perilaku terkontrol tarik yang ditunjukkan dengan lelehnya baja sebelum hancurnya beton. Leleh baja dapat memberikan daktilitas dan peringatan kegagalan elemen. Pendekatan ini perlu dilakukan pertimbangan lebih lanjut dengan memperhatikan adanya perilaku getas dari penulangan FRP.

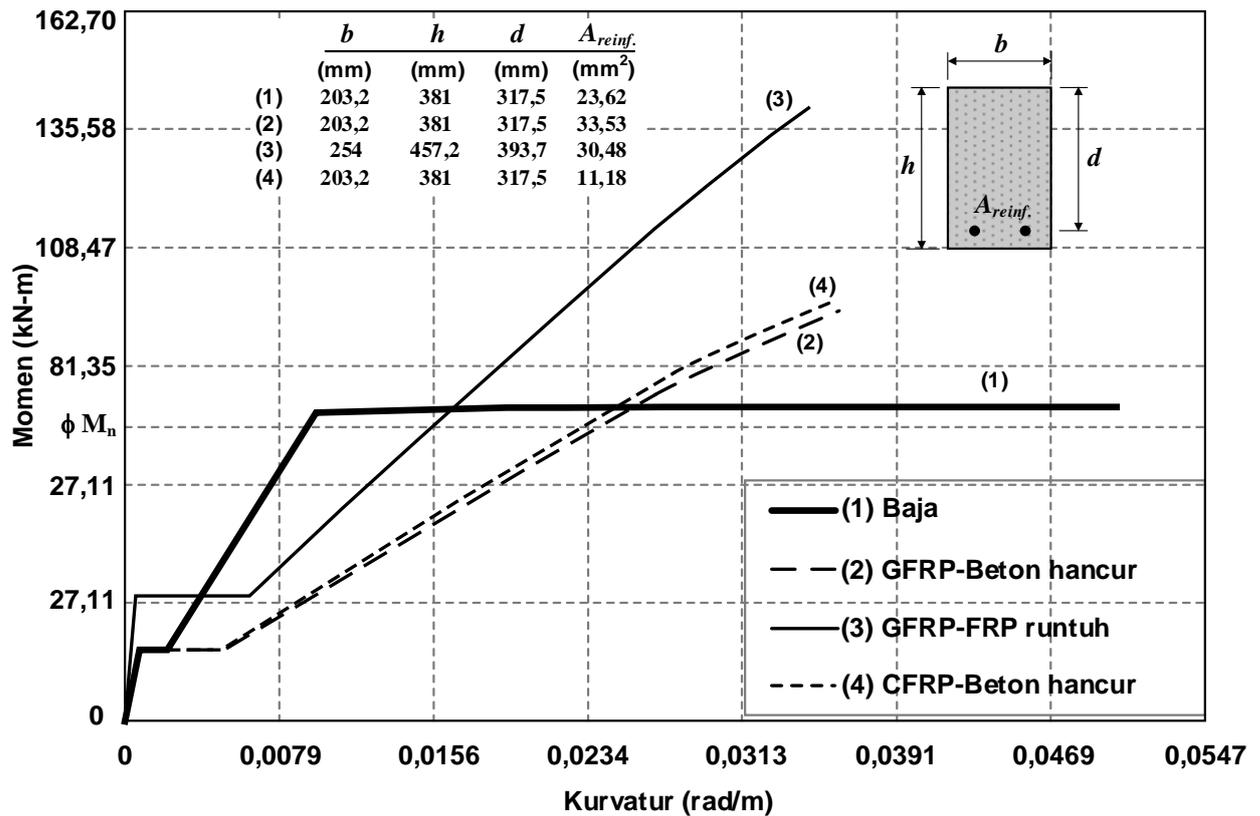
Jika penulangan FRP runtuh, kegagalan komponen terjadi tiba-tiba dan tak terduga (Nanni 1993b; Jaeger et al. 1997; GangaRao dan Vijay 1997a; Theriault dan Benmokrane 1998); namun, akan ada sedikit peringatan tentang kegagalan yang akan terjadi dalam bentuk retak yang berkelanjutan dan defleksi yang besar karena perpanjangan elastis yang signifikan yang dialami oleh penulangan FRP sebelum runtuh. Dalam hal apa pun, komponen tersebut tidak akan memperlihatkan daktilitas seperti yang biasa diamati untuk balok beton yang terkontrol tarik yang menggunakan tulangan baja, di mana balok memperlihatkan deformasi plastis sebelum beton hancur.

Perilaku terkontrol tekan sedikit lebih diharapkan untuk elemen lentur menggunakan tulangan batang FRP (Nanni 1993b). Apabila beton mengalami keruntuhan tekan sebelum tulangan FRP runtuh tarik maka sebuah batang lentur akan mengalami sedikit perilaku inelastik sebelum hancur.

Sebagai kesimpulan, baik penampang terkontrol tekan dan terkontrol tarik dapat diterima dalam desain elemen lentur yang menggunakan tulangan batang FRP, asalkan kriteria kekuatan dan kemampuan layan dipenuhi. Untuk mengimbangi rendahnya daktilitas, elemen harus memiliki cadangan kekuatan yang lebih tinggi. Karena itu faktor keselamatan yang disarankan oleh tata cara ini terhadap kegagalan lebih tinggi daripada yang digunakan dalam desain beton bertulang baja tradisional.

Penggunaan beton kekuatan tinggi memungkinkan pemanfaatan yang lebih baik dari sifat kekuatan tinggi batang FRP dan dapat meningkatkan kekakuan penampang retak, tetapi kegetasan beton mutu tinggi bila dibandingkan dengan beton kekuatan normal, dapat mengurangi deformabilitas komponen lentur (GangaRao dan Vijay 1997a).

Gambar 7.1.1 menunjukkan perbandingan perilaku momen kurvatur teoritis dari penampang balok yang dirancang untuk kekuatan yang sama  $\phi M_n$ , mengikuti prinsip-prinsip desain kekuatan ultimit yang dijelaskan dalam Pasal ini, termasuk faktor reduksi kekuatan yang direkomendasikan sesuai dengan tata cara ini untuk FRP dan ACI 318 untuk baja. Tiga kasus disajikan sebagai tambahan pada penampang yang menggunakan tulangan baja: dua bagian menggunakan tulangan batang FRP gelas (GFRP), dan satu yang menggunakan tulangan batang FRP karbon (CFRP). Untuk penampang yang menggunakan tulangan GFRP terkontrol tarik, dimensi beton lebih besar daripada balok lainnya untuk mencapai kapasitas desain yang sama.



Gambar 7.1.1 – Hubungan momen kurvatur teoretis untuk penampang beton bertulang menggunakan tulangan baja dan FRP (faktor  $\phi$  sebesar 0,9, 0,65, 0,55, dan 0,65 secara berurutan untuk baja yang terkontrol tarik, GFRP yang terkontrol tekan, GFRP yang terkontrol tarik, dan CFRP yang terkontrol tekan)

### 7.1.2 Asumsi

Perhitungan kekuatan penampang harus dilakukan berdasarkan asumsi berikut:

- Regangan pada beton dan penulangan FRP sebanding dengan jarak dari sumbu netral (penampang datar sebelum pembebanan dan tetap datar setelah pembebanan).
- Regangan tekan maksimum yang dapat digunakan dalam beton diasumsikan 0,003.
- Kekuatan tarik beton diabaikan.
- Perilaku tarik dari penulangan FRP adalah linear elastis sampai runtuh.
- Terdapat lekatan sempurna antara tulangan beton dan FRP

### 7.2 Kekuatan Lentur

Filosofi desain kekuatan menyatakan bahwa kekuatan lentur desain pada bagian suatu komponen harus melebihi momen terfaktor (Persamaan (7.2)). Desain kekuatan lentur mengacu pada kekuatan lentur nominal komponen dikalikan dengan faktor reduksi kekuatan ( $\phi$ , dibahas dalam 7.2.3). Momen terfaktor mengacu pada momen yang dihitung dengan menggunakan beban terfaktor sebagaimana ditentukan dalam ACI 318 (sebagai contoh,  $1,2D + 1,6L + \dots$ )

$$\phi M_n \geq M_u \quad (7.2)$$

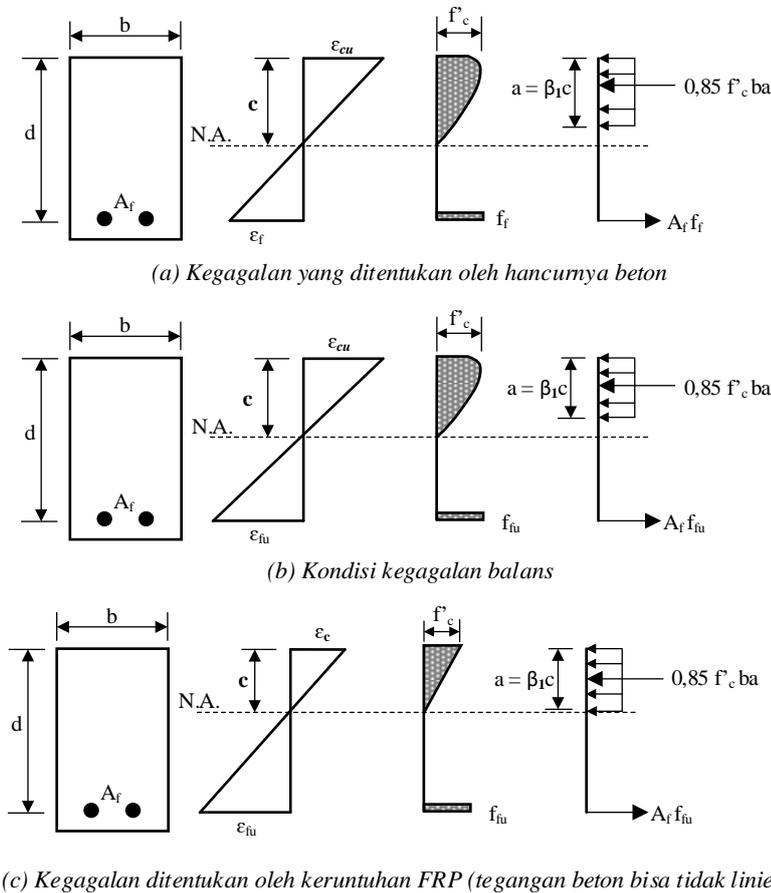
Kekuatan lentur nominal dari komponen beton yang menggunakan tulangan FRP dapat ditentukan berdasarkan kompatibilitas regangan, kesetimbangan gaya internal, dan keadaan batas kekuatan kontrol (beton hancur atau FRP runtuh). Gambar 7.2 mengilustrasikan tekanan,

regangan, dan gaya internal untuk tiga kemungkinan kasus penampang persegi panjang yang menggunakan tulangan batang FRP.

**7.2.1 Kondisi kekuatan batas**

Kapasitas lentur dari komponen lentur yang menggunakan tulangan FRP tergantung pada apakah ia dikontrol oleh beton hancur atau runtuhnya FRP. Keadaan batas kontrol dapat ditentukan dengan membandingkan rasio penulangan FRP dengan rasio tulangan balans, yang merupakan rasio di mana beton hancur dan runtuhnya FRP terjadi secara bersamaan. Karena FRP tidak leleh, rasio balans dari penulangan FRP dihitung dengan menggunakan kekuatan tarik desainnya. Rasio penulangan FRP dapat dihitung dari Persamaan (7.2.1a), dan rasio penulangan FRP balans dapat dihitung dari Persamaan (7.2.1b)

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \tag{7.2.1a}$$



**Gambar 7.2.1 – Distribusi tegangan regangan kondisi ultimit**

$$\rho_{fb} = 0,85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu} + f_{fu}} \tag{7.2.1b}$$

Jika rasio tulangan lebih kecil dari rasio kondisi balans ( $\rho_f < \rho_{fb}$ ), kegagalan ditentukan oleh keruntuhan FRP. Jika sebaliknya, ( $\rho_f > \rho_{fb}$ ) kegagalan ditentukan oleh hancurnya beton.

Tabel 7.2.1 memuat beberapa nilai tipikal untuk rasio tulangan kondisi balans, menunjukkan bahwa rasio balans untuk penulangan FRP  $\rho_{fb}$  jauh lebih rendah daripada rasio balans untuk tulangan baja  $\rho_b$ . Rasio balans untuk penulangan FRP bahkan bisa lebih rendah daripada rasio tulangan minimum untuk baja ( $\rho_{min} = 0,0035$  untuk baja *Grade* 60 dan  $f_c' = 34,5$  MPa).

**Tabel 7.2.1 – Nilai umum untuk rasio tulangan kondisi balans untuk persegi panjang dengan  $f_c' = 34,5$  MPa**

Tipe batang	Kuat leleh $f_y$ atau kekuatan tarik $f_{far}$ (MPa)	Modulus Elastisitas (GPa)	$\rho_b$ atau $\rho_{fb}$
Baja	414	200	0,0335
GFRP	552	41,4	0,0078
AFRP	1172	82,7	0,0035
CFRP	2070	152	0,0020

### 7.2.2 Kekuatan lentur nominal

Ketika  $\rho_f > \rho_{fb}$ , keadaan batas yang menjadi kontrol adalah hancurnya beton, dan distribusi tegangan dalam beton dapat diperkirakan dengan blok tegangan segi empat ACI. Berdasarkan keseimbangan kekuatan dan kompatibilitas regangan (ditunjukkan pada Gambar 7.2), dapat diturunkan berikut ini.

$$M_n = A_f f_f \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (7.2.2a)$$

$$a = \frac{A_f f_f}{0,85 f_c' b} \quad (7.2.2b)$$

$$f_f = E_f \varepsilon_{cu} \frac{\beta_1 d - a}{a} \quad (7.2.2c)$$

Substitusi  $a$  dari Persamaan (7.2.2b) ke Persamaan (7.2.2c) dan diuraikan sehingga  $f_f$  menjadi

$$f_f = \left( \sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85 \beta_1 f_c'}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0,5 E_f \varepsilon_{cu} \right) \leq f_{fu} \quad (7.2.2d)$$

Kekuatan lentur nominal dapat ditentukan oleh (7.2.2a), (7.2.2b), dan (7.2.2d). Pada kondisi batas hancurnya beton, penulangan FRP elastik linear, sehingga tingkat tegangan pada FRP dapat ditemukan dari Persamaan (7.2.2c) karena lebih kecil dari  $f_{fu}$ .

Sebagai alternatif, kekuatan lentur nominal dapat dinyatakan dalam rasio penulangan FRP, seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (7.2.2e) untuk menggantikan Persamaan (8.2.2a).

$$M_n = \rho_f f_f \left( 1 - 0,59 \frac{\rho_f f_f}{f_c'} \right) b d^2 \quad (7.2.2e)$$

Ketika  $\rho_f < \rho_{fb}$ , kondisi batas untuk kontrol adalah runtuhnya penulangan FRP, dan kekuatan lentur nominal pada bagian tersebut dapat dihitung dengan Persamaan (7.2.2f)

$$M_n = A_f f_{fu} \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (7.2.2f)$$

Meskipun tegangan pada tulangan diketahui, analisis ini memiliki dua hal yang tidak diketahui: regangan tekan beton pada saat ultimit ketika FRP runtuh tarik ( $\epsilon_c$ ) dan tinggi garis netral  $c$ . Analisis yang melibatkan kedua hal yang tidak diketahui ini menjadi kompleks dan tidak mudah dipecahkan dengan solusi bentuk-tertutup. Parameter blok tegangan persegi ACI juga tidak berlaku karena regangan beton maksimum mungkin tidak tercapai ( $\epsilon_c < \epsilon_{cu}$ ). Dalam hal ini, parameter blok tegangan persegi ekuivalen ( $\alpha_1$  dan  $\beta_1$ ) merupakan pendekatan posisi sentroid distribusi tegangan pada beton pada level regangan tertentu perlu digunakan. Faktor  $\alpha_1$  adalah rasio tegangan beton rata-rata terhadap kekuatan beton. Faktor  $\beta_1$  adalah rasio ketinggian blok tegangan persegi terhadap tinggi sumbu netral.

Untuk penampang tertentu,  $\beta_1 c$  dalam Persamaan (7.2.2f) bervariasi tergantung pada sifat material dan rasio penulangan FRP. Untuk bagian yang terkontrol oleh batas runtuh FRP, nilai maksimum perkalian ini sama dengan  $\beta_1 c_b$  dan dicapai ketika regangan beton maksimum (0,003) tercapai. Oleh karena itu, perhitungan batas bawah yang disederhanakan dan konservatif dari kekuatan lentur nominal komponen dapat didasarkan pada Persamaan (7.2.2g) dan (7.2.2h) sebagai berikut

$$M_n = A_f f_{fu} \left( d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right) \quad (7.2.2g)$$

$$c_b = \left( \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fu}} \right) d \quad (7.2.2h)$$

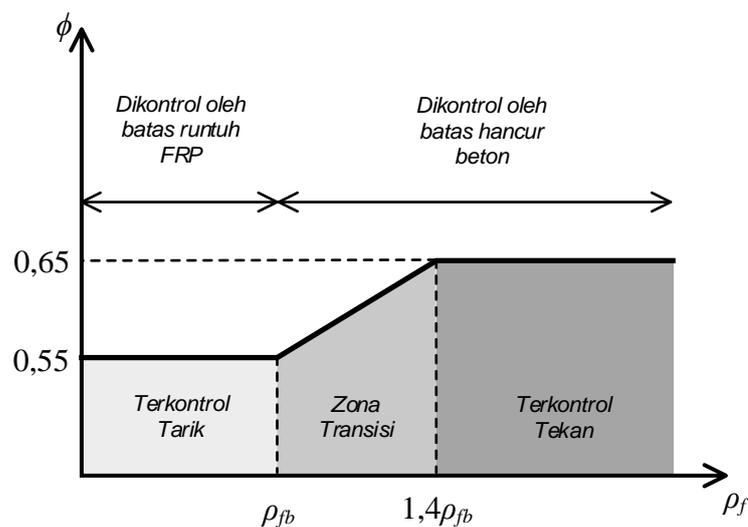
### 7.2.3 Faktor reduksi kekuatan lentur

Karena FRP tidak menunjukkan perilaku daktil, faktor pengurangan kekuatan konservatif harus digunakan untuk memberikan cadangan kekuatan yang lebih tinggi pada komponen. Rekomendasi Jepang untuk desain komponen lentur menggunakan FRP menyarankan faktor reduksi kekuatan sama dengan 0,77 (*Japan Society of Civil Engineer* 1997b). Peneliti lain (Benmokrane et al. 1996) menyarankan nilai 0,75 berdasarkan konsep probabilistik. Berdasarkan ACI 318, faktor  $\phi$  untuk desain bagian yang terkontrol tekan adalah 0,65, dengan indeks keandalan target antara 3,5 dan 4,0 (Szczeszen dan Nowak 2003). Analisis reliabilitas pada balok yang menggunakan tulangan FRP terbebani lentur menggunakan kombinasi beban 2 dari ACI 318 untuk rasio beban hidup-mati antara 1 dan 3 menunjukkan indeks keandalan antara 3,5 dan 4,0 ketika faktor  $\phi$  ditentukan 0,65 untuk penampang yang terkontrol tekan, dan 0,55 untuk penampang yang terkontrol tarik dengan menggunakan Persamaan (7.2.2g) (Shield et al. 2011). Analisis nonlinear kurvatur saat runtuh menunjukkan bahwa kurvatur tipikal dari balok yang menggunakan tulangan FRP saat runtuh bervariasi antara  $0,016/d$  dan  $0,018/d$  untuk kegagalan yang terkontrol tarik, dan antara  $0,011/d$  dan  $0,02/d$  untuk kegagalan yang terkontrol tekan (Shield dkk. 2011).

ACI 318 mempertimbangkan bagian yang terkontrol tarik bila kurvatur lebih besar dari  $0,008/d$  (sesuai dengan regangan pada baja 0,005). Ini menunjukkan bahwa karena modulus elastisitas tulangan yang rendah, balok yang menggunakan tulangan FRP akan memiliki lendutan yang besar pada kondisi ultimit, dan bahwa balok yang menggunakan tulangan FRP

dengan batas kontrol runtuhnya FRP akan memiliki lendutan yang lebih besar daripada yang dikontrol oleh hancurnya beton. Meskipun nilai kurvatur balok yang menggunakan tulangan FRP lebih besar dari pada balok yang menggunakan tulangan baja yang ekuivalen, Komite merekomendasikan faktor  $\phi$  sebesar 0,55 untuk desain penampang yang terkontrol tarik untuk mempertahankan indeks keandalan minimum 3,5.

Walaupun keadaan batas hancurnya beton dapat diprediksi berdasarkan perhitungan, komponen yang dibuat mungkin runtuh nya tidak sesuai. Misalnya, jika kekuatan beton lebih tinggi dari yang ditentukan, kapasitas penampang dikontrol oleh runtuhnya FRP. Untuk alasan ini, dan untuk membangun transisi antara dua nilai  $\phi$ , bagian beton bertulang FRP yang terkontrol tekan didefinisikan sebagai bagian di mana  $\rho_f \geq 1,4 \rho_{fb}$ , dan bagian beton bertulang FRP yang terkontrol tekan didefinisikan bila  $\rho_f \leq \rho_{fb}$ . Penampang dengan  $\rho_{fb} < \rho_f < 1,4 \rho_{fb}$  secara teoritis akan dikontrol oleh keadaan batas hancurnya beton, tetapi nilai  $\phi$  yang lebih kecil harus digunakan, relatif terhadap bagian yang terkontrol tekan.



**Gambar 7.2.3 – Faktor reduksi kekuatan sebagai fungsi rasio tulangan**

Faktor reduksi kekuatan untuk lentur dapat dihitung dengan Persamaan (7.2.3). Persamaan ini diwakili secara grafis oleh Gambar 7.2.3, dan memberikan faktor 0,65 untuk bagian yang terkontrol tekan, 0,55 untuk bagian yang dikontrol tarik, dan menyediakan transisi linear antara kedua kondisi ini

$$\phi = \begin{cases} 0,55 & \text{untuk } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0,3 + 0,25 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} & \text{untuk } \rho_{fb} < \rho_f < 1,4\rho_{fb} \\ 0,65 & \text{untuk } \rho_f \leq 1,4\rho_{fb} \end{cases} \quad (7.2.3)$$

#### 7.2.4 Penulangan FRP minimum

Jika suatu penampang terkontrol tarik ( $\rho_f \leq \rho_{fb}$ ) harus disediakan tulangan minimum untuk mencegah retak pada beton,  $\phi M_n \geq M_{cr}$ , dimana  $M_{cr}$  adalah momen retak. Ketentuan dalam ACI 318 untuk tulangan minimum didasarkan pada konsep ini dan, dengan modifikasi, berlaku untuk komponen yang menggunakan tulangan FRP. Modifikasi dihasilkan dari faktor reduksi kekuatan yang berbeda — 0,55 untuk bagian yang terkontrol tarik, bukan 0,9. Luas tulangan minimum untuk komponen yang menggunakan tulangan FRP diperoleh dengan mengalikan

## SNI 8970:2021

persamaan dalam ACI 318 yang ada untuk tulangan baja sebesar 1,64 ( $1,64 = 0,90/0,55$ ). Ini menghasilkan Persamaan (7.2.4)

$$A_{f,min} = \frac{0,41\sqrt{f_c}}{f_{fu}} b_w d \geq \frac{2,3}{f_{fu}} b_w d \quad (7.2.3)$$

Jika penampang tidak dikontrol tarik ( $\rho_f > \rho_{fb}$ ), jumlah minimum tulangan untuk mencegah kegagalan retak secara otomatis tercapai. Oleh karena itu, Persamaan (7.2.4) diperlukan sebagai cek hanya jika  $\rho_f \leq \rho_{fb}$ . Persyaratan Persamaan (7.2.4) tidak perlu diterapkan jika pada setiap bagian luas tulangan yang disediakan setidaknya sepertiga lebih besar dari yang dibutuhkan oleh analisis.

### 7.2.5 Pertimbangan khusus

#### 7.2.5.1 Penulangan berlapis dan kombinasi dari tipe FRP yang berbeda

Pada penampang yang terkontrol tekan, semua tulangan baja diasumsikan leleh pada kondisi ultimit ketika menggunakan metode desain kekuatan untuk menghitung kekuatan lentur nominal elemen dengan tulangan baja yang dipasang berlapis. Oleh karena itu, gaya tarik diasumsikan bekerja pada pusat massa tulangan dengan besarnya sama dengan luas tulangan dikalikan kekuatan leleh baja. Karena bahan FRP tidak memiliki daerah plastis, tegangan pada setiap lapisan tulangan akan bervariasi tergantung pada jaraknya dari sumbu netral. Dalam kasus ini, regangan pada lapisan terluar harus digunakan untuk menentukan apakah penampang tersebut terkontrol tekan atau tarik. Analisis kapasitas lentur harus didasarkan pada pendekatan kompatibilitas-regangan. Demikian pula, jika tipe batang FRP yang berbeda digunakan untuk memperkuat bagian yang sama, variasi tingkat tegangan pada masing-masing tipe tulangan harus dipertimbangkan ketika menghitung kapasitas lentur.

#### 7.2.5.2 Redistribusi momen

Sendi plastis tidak terbentuk pada bagian yang menggunakan tulangan batang FRP karena berperilaku linear-elastis hingga runtuh. Oleh karena itu, redistribusi momen untuk balok menerus atau struktur statis tak tentu lain tidak boleh dipertimbangkan untuk beton yang menggunakan tulangan FRP.

#### 7.2.5.3 Penulangan tekan

Penulangan FRP memiliki kekuatan tekan yang jauh lebih rendah daripada kekuatan tarik, dan sangat bervariasi (Kobayashi dan Fujisaki 1995; *Japan Society of Concrete Engineers* 1997b). Oleh karena itu, kekuatan tekan batang FRP harus diabaikan dalam perhitungan desain (Almusallam et al.1997).

Untuk beberapa kasus penempatan batang FRP di zona tekan komponen lentur, tidak dapat dihindari. Contohnya termasuk pada tumpuan balok menerus atau di mana batang menahan sengkang pada tempatnya. Dalam kasus ini, pengekangan untuk batang FRP di daerah tekan untuk mencegah ketidakstabilan dan untuk meminimalkan efek ekspansi transversal yang relatif tinggi dari beberapa jenis batang FRP harus dipertimbangkan. Penulangan FRP melintang dalam bentuk sengkang harus memiliki spasi yang lebih kecil dari dimensi penampang terkecil atau 16 diameter batang longitudinal atau 48 diameter sengkang.

## 7.3 Kemampuan layan

Beton yang menggunakan tulangan FRP memiliki kekakuan yang relatif rendah setelah mengalami retak, jika dibandingkan dengan beton bertulang baja dengan rasio tulangan yang sama. Oleh sebab itu, defleksi yang diizinkan pada beban layan dapat menjadi kontrol dalam desain. Secara umum, desain penampang yang menggunakan tulangan FRP dapat tidak memenuhi kriteria kemampuan layan untuk defleksi dan kontrol retak (Nanni 1993a; Ganga Rao and Vijay 1997a; Theriault and Benmokrane 1998; Bischoff 2005).

Kemampuan layan dapat didefinisikan sebagai kinerja yang baik dalam kondisi beban layan. Hal ini dapat diuraikan dalam dua kriteria:

- 1) Retak — lebar retak yang berlebihan tidak diinginkan karena alasan estetika dan lainnya (misalnya, untuk mencegah kebocoran air) yang dapat merusak atau memperburuk beton struktur.
- 2) Defleksi — defleksi harus dalam batas yang dapat diterima yang terjadi oleh penggunaan struktur (misalnya, mendukung elemen nonstruktural yang terpasang tanpa kerusakan).

Ketentuan kemampuan layan yang diberikan dalam ACI 318, bagian 9.5 untuk defleksi dan bagian 10.6 untuk kontrol retak, perlu dimodifikasi untuk elemen yang menggunakan tulangan FRP untuk memperhitungkan peningkatan fleksibilitas saat menggunakan kekakuan tulangan yang lebih rendah. Substitusi FRP untuk baja pada luas permukaan yang setara, pada contohnya, biasanya akan menghasilkan defleksi yang lebih besar dan lebar retak yang lebih lebar. (Gaoetal.1998a; Tighiouartetal.1998).

### 7.3.1 Retak

Batang FRP tahan terhadap korosi, oleh sebab itu, jika korosi pada tulangan menjadi penyebab utama dalam kontrol retak, lebar retak yang lebih besar jika dibandingkan dengan beton bertulang baja dapat ditoleransi. Pertimbangan lain untuk menerima batas lebar retak meliputi estetika, runtuh akibat rangkai dan efek geser.

Terdapat dua metodologi desain untuk menghitung penulangan dalam mengendalikan retak lentur: 1) prosedur langsung dimana lebar retak dihitung; dan 2) prosedur tidak langsung dimana batas spasi batang maksimum ditentukan. Kontrol retak secara langsung mengacu pada perhitungan lebar retak yang mungkin terjadi dan perbandingannya dengan lebar retak yang diizinkan. Pendekatan ini diikuti oleh *Japan Society of Civil Engineers* (1997b), yang hanya mempertimbangkan estetika dalam menentukan lebar retak maksimum yang diizinkan yaitu 0,50 mm dan oleh CAN/CSAS6-06, yang secara eksplisit memungkinkan proporsi penulangan FRP sedemikian rupa sehingga lebar retak tidak melebihi 0,50 mm untuk komponen yang terpapar lingkungan yang agresif dan 0,70 mm untuk komponen lainnya. Ketentuan kontrol retak ACI 318 tidak membahas penulangan FRP. Untuk tujuan perbandingan, ketentuan kontrol retak untuk tulangan baja pada ACI 318 sesuai dengan lebar retak maksimum yang bervariasi sekitar 0,46 mm dan 0,56 mm.

Karena kekhawatiran terhadap kecukupan model empiris yang diusulkan oleh Gergely and Lutz (1968) untuk memprediksi lebar retak pada elemen lentur dengan selimut beton yang tebal maka ACI 318-99 mengusulkan penggunaan faktor-z. Faktor-z digunakan untuk kontrol retak dengan prosedur tidak langsung melalui jarak antar tulangan. Ketergantungan terhadap kondisi paparan juga dihilangkan. Sebagai alternatif penentuan lebar retak maksimum yang diizinkan penentuan spasi batangan maksimum menjadi penting untuk memenuhi persyaratan layan. Persyaratan kemampuan layan batas dari retak ini didasarkan pada sifat penulangan FRP dan berhubungan dengan tegangan (regangan) batang FRP pada kondisi beban layan. Prosedur saat ini juga menyetujui efek dominan yang selimut beton miliki pada retak lentur.

## SNI 8970:2021

Ketentuan jarak tulangan maksimum ACI 318 berasal dari formulasi lebar retak yang dikembangkan oleh Frosch (1999), yang didasarkan dari model fisik daripada diturunkan secara empiris.

Agar konsisten dengan ACI 318, kontrol retak lentur pada balok beton dengan penulangan FRP dan pelat satu arah dapat dilakukan dengan menetapkan jarak batang FRP maksimum yaitu

$$s_{max} = 1,15 \frac{E_f w}{f_{fs} k_b} - 2,5c_c \leq 0,92 \frac{E_f w}{f_{fs} k_b} \quad (7.3.1a)$$

Prosedur kontrol retak lentur yang diusulkan dikatakan tidak langsung karena jarak maksimum batang FRP ditentukan oleh Persamaan (7.3.1a) secara tidak langsung akan memenuhi target lebar retak maksimum yang diizinkan. Alasan di balik pendekatan kontrol retak lentur tidak langsung ini dijelaskan oleh Ospina dan Bakis (2007).

Untuk level tegangan FRP yang dipilih dan target batas lebar retak, evaluasi jarak tulangan maksimum dalam Persamaan (7.3.1a) harus didasarkan pada nilai  $d_c$  yang sesuai dengan Pers (7.3.1b). Jika nilai  $d_c$  yang lebih besar diperlukan untuk persyaratan durabilitas atau alasan lain dan batas lebar retak maksimum tidak dapat dilonggarkan, maka perlu untuk mengurangi tingkat tegangan pada penulangan FRP. Ini dapat dicapai, misalnya, dengan meningkatkan jumlah tulangan lentur.

$$d_c \leq \frac{E_f w}{2 f_{fs} \beta k_b} \quad (7.3.1b)$$

Pemilihan lebar retak batas yang digunakan dalam Persamaan (7.3.1a) dan (7.3.1b) tergantung pada tujuan penggunaan struktur. Prosedur ini memungkinkan untuk mengontrol berbagai tingkat retak lentur, mulai dari retakan yang sangat sempit pada struktur di lingkungan agresif atau di mana diperlukan kedekatan air, hingga situasi di mana retakan yang lebih lebar dapat diterima karena ketahanan korosi penulangan FRP lebih diutamakan. Secara umum, lebar retak pada elemen yang menggunakan penulangan FRP akan lebih besar dari pada pada elemen yang menggunakan tulangan baja. Dalam situasi di mana lebar retak dibatasi oleh alasan estetika, batas lebar retak antara 0,4 mm hingga 0,7 mm secara umum dapat diterima

Tegangan FRP pada kondisi beban layan,  $f_{fs}$ , dapat dievaluasi dengan melakukan analisis penampang retak elastis. Rekomendasi untuk tegangan tulangan pada beban layan dalam ACI 318 ( $f_s = 0,67f_y$ ) hanya dapat diaplikasikan pada beton bertulang baja ketika kekuatan desain ditentukan berdasarkan kriteria tulangan baja leleh pada saat runtuh. Pendekatan yang sama tidak dapat dilakukan untuk beton yang menggunakan tulangan FRP. Pada kasus ini kriteria desain ditentukan oleh batas layan terkait dengan defleksi dan kontrol lebar retak atau oleh keruntuhan pengaruh fatik dan rangkai.

Suku  $k_b$  adalah koefisien yang menggambarkan lekatan antara FRP dengan beton. Untuk batang FRP dengan perilaku lekatan yang mirip dengan baja yang tidak terlekat, koefisien lekatan  $k_b$  diasumsikan sama dengan 1,0. Untuk batang FRP dengan lekatan lebih rendah dari baja,  $k_b$  lebih besar 1,0, dan untuk batang FRP yang memiliki lekatan lebih besar dari baja,  $k_b$  lebih kecil dari 1,0. Metode untuk menentukan nilai  $k_b$  telah disetujui oleh Canadian Standards Association dalam CAN/CSA S806-12. Untuk analisis data lebar retak yang dilakukan oleh Bakis et al. (2006) terhadap variasi penampang beton dan produsen batang FRP, tipe serat,

formula resin, dan perawatan permukaan, nilai  $k_b$  berkisar antara 0,60 hingga 1,72, dengan rata-rata 1,10. Data batang FRP yang permukaannya dikasarkan dengan metode pasir cenderung mengarah pada nilai terendah dari rentang itu. Hasil konsensus, untuk kasus dimana  $k_b$  tidak diketahui dari data eksperimental, diasumsikan nilai konservatif sebesar 1,4. Batang halus dan grid secara khusus tidak termasuk dalam rekomendasi ini. Analisis lebih lanjut dibutuhkan sebelum konsensus nilai  $k_b$  dicapai untuk tulangan jenis tersebut.

Bakis and Boothby (2004) menemukan bahwa lebar retak pada balok beton yang menggunakan tulangan GFRP akibat beban tetap, meningkat melebihi nilai awal sebesar sekitar 40 persen untuk kondisi di dalam ruangan dan sekitar 60 persen di lingkungan luar selama periode 3 tahun. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menguji dampak efek jangka panjang pada ketentuan desain kontrol retak lentur ini.

### 7.3.2 Defleksi

Secara umum, ketentuan ACI 318 untuk kontrol lendutan memperhatikan lendutan yang terjadi pada kondisi layan akibat beban seketika dan beban tetap, dan tidak dapat diaplikasikan pada beban dinamik seperti gempa, beban angin, atau getaran mesin. Dua metode ACI 318 untuk kontrol lendutan komponen lentur satu arah adalah:

- 1) Metode tidak langsung dengan mensyaratkan ketebalan minimum elemen (Tabel 9.5(a) ACI 318).
- 2) Metode langsung dengan membatasi lendutan terhitung (Tabel 9.5(b) ACI 318).

Karena variasi kekakuan, perilaku getas-elastik, dan lekatan dari penulangan FRP, defleksi komponen beton yang menggunakan tulangan FRP lebih sensitif daripada komponen yang menggunakan tulangan baja dengan ukuran dan tata letak tulangan yang sama. Lendutan elemen dengan penulangan FRP juga cenderung lebih besar karena kekakuan yang rendah terkait adanya penulangan FRP yang beredar dipasaran. Oleh sebab itu, pedoman ini merekomendasikan penggunaan metode kontrol lendutan langsung, seperti yang diuraikan dalam 7.3.2.2 dan 7.3.2.3. Rekomendasi ketebalan minimum untuk komponen yang menggunakan tulangan FRP ditunjukkan pada 7.3.2.1 untuk kemudahan desain dalam menentukan proporsi awal komponen. Dimensi komponen mungkin butuh direvisi berdasarkan hitungan batas lendutan.

#### 7.3.2.1 Rekomendasi tebal minimum untuk desain

Rekomendasi desain ketebalan minimum untuk pelat satu arah dan balok disediakan pada Tabel 7.3.2.1. Tabel ini hanya ditujukan untuk tata cara desain awal. Penggunaan rekomendasi ketebalan minimum ini tidak menjamin bahwa semua pertimbangan lendutan dapat terpenuhi untuk proyek tertentu.

**Tabel 7.3.2.1 – Rekomendasi ketebalan minimum balok atau pelat satu arah nonprategang**

Elemen	Ketebalan Minimum $h$			
	Tumpuan sederhana	Satu tumpuan menerus	Dua tumpuan menerus	Kantilever
Pelat satu arah pejal	$l/13$	$l/17$	$l/22$	$l/5,5$
Balok	$l/10$	$l/12$	$l/16$	$l/4$

Nilai pada Tabel 7.3.2.1 berdasarkan batas rasio maksimum bentang terhadap tinggi (Ospina et al. 2001) sesuai batas kurvatur yang berhubungan dengan target rasio bentang-lendutan

(Persamaan 7.3.2.1). Seperti yang dideskripsikan secara detail oleh Ospina and Gross (2005), prosedur ini dapat diaplikasikan pada elemen lentur pada beban layan dengan jenis tulangan linear elastik tipe manapun.

$$\frac{\ell}{h} \leq \frac{48\eta}{5K_1} \left( \frac{1-k}{\varepsilon_{fs}} \right) \left( \frac{\Delta}{\ell} \right)_{max} \quad (7.3.2.1)$$

dimana  $\eta = d/h$ ;  $k$  seperti yang didefinisikan pada Persamaan (7.3.2.2b); dan  $(\Delta/\ell)_{max}$  adalah batas rasio lendutan-bentang beban layan.  $K_1$  adalah sebuah parameter kondisi batas untuk: tumpuan sederhana dengan beban merata; satu tumpuan menerus; dua tumpuan menerus; dan kantilever yang dapat diambil sebesar 1,0, 0,8, 0,6, dan 2,4. Terminologi  $\varepsilon_{fs}$  adalah regangan penulangan FRP pada beban layan, yang dievaluasi pada tengah bentang kecuali bentang kantilever. Untuk kantilever,  $\varepsilon_{fs}$  harus dievaluasi pada perletakan.

Persamaan (7.3.2.1) mengasumsikan tidak ada kontribusi tegangan tarik beton diantara retak, yang disebut sebagai *tension stiffening*. Untuk mempertimbangkan efek *tension stiffening* pada pembuatan Tabel 7.3.2.1, hasil yang didapat dari Persamaan (7.3.2.1) dimodifikasi dengan rasio inersia efektif dan inersia saat retak yang dihitung dengan Persamaan (7.3.2.2c) dan (7.3.2.2a). Nilai-nilai yang ditabelkan berdasar pada asumsi batas lendutan layan  $\ell/240$  dengan beban layan total dan asumsi rasio tulangan masing-masing  $2,0\rho_{fb}$  dan  $3,0\rho_{fb}$  untuk pelat dan balok.

### 7.3.2.2 Momen inersia efektif

Penampang tidak retak memiliki momen inersia setara dengan momen inersia gross,  $I_g$ . Retak terjadi saat momen beban layan  $M_a$  melebihi momen retak  $M_{cr}$ , dan hal ini menyebabkan berkurangnya kekakuan komponen. Momen inersia penampang retak,  $I_{cr}$ , untuk komponen persegi empat dengan tulangan tunggal dihitung untuk penampang retak transformasi menggunakan analisa elastis dengan Persamaan (7.3.2.2a) dan Persamaan (7.3.2.2b).

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3} k^3 + n_f A_f d^2 (1-k)^2 \quad (7.3.2.2a)$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad (7.3.2.2b)$$

Kekakuan lentur total  $E_c I$  dari komponen retak bervariasi antara  $E_c I_g$  dan  $E_c I_{cr}$ , tergantung pada besaran beban momen layan dan besarnya retak yang terjadi pada penampang tersebut. Branson (1965) memperkenalkan konsep momen inersia efektif,  $I_e$ , untuk memungkinkan transisi bertahap dari  $I_g$  ke  $I_{cr}$ . Pendekatan ini menjelaskan dua hal yang berbeda: efek *tension stiffening* pada beton dan variasi  $EI$  sepanjang komponen. Persamaan Branson (1965) untuk momen inersia efektif,  $I_e$ , diadopsi oleh ACI 318-71.

Seperti yang didemonstrasikan oleh Bischoff (2005), persamaan Branson memprediksi kekakuan komponen yang terlalu besar (*overestimates*) ketika  $I_g/I_{cr}$  komponen lebih besar dari 3 atau 4. Hal ini sesuai untuk kebanyakan balok beton yang menggunakan tulangan FRP yang memiliki  $I_g/I_{cr}$  antara 5 dan 25. Inilah alasan mengapa penelitian terdahulu mengenai defleksi balok beton yang menggunakan tulangan FRP (Nawy and Neuwerth 1977; Benmokrane et al. 1996; Yost et al. 2003) telah menunjukkan bahwa persamaan Branson menghasilkan nilai lendutan lebih rendah (*underestimates*), terutama untuk elemen dengan  $I_g/I_{cr}$  yang tinggi.

Beberapa penulis telah mengusulkan momen inersia efektif untuk beton yang menggunakan tulangan FRP. Benmokrane et al. (1996) pertama kali memasukkan faktor koreksi empiris ke dalam persamaan Branson yang diperlukan untuk mereduksi *tension stiffening* dan memberikan estimasi yang wajar pada perhitungan lendutan. Modifikasi lain pada persamaan Branson meliputi variasi faktor koreksi telah diusulkan pada literatur (Gao et al. 1998a; Toutanji and Saafi 2000; Yost et al. 2003). Pendekatan Branson yang dimodifikasi ini diadopsi pada edisi terdahulu dari ACI 440.1R. Ahli lain telah mengusulkan berbagai metode yang bergantung pada asumsi-asumsi berbeda mengenai *tension stiffening* dan variasi kekakuan sepanjang komponen (Fazaa 1992; Razaqpur et al. 2000; Rasheed et al. 2004; Bischoff 2005). Model-model ini menunjukkan tingkat akurasi yang berbeda jika dibandingkan dengan data eksperimental (Mota et al. 2006; Bischoff et al. 2009).

Bischoff (2005) mengusulkan alternatif perumusan untuk momen inersia efektif yang dapat digunakan untuk beton bertulang baja maupun FRP tanpa memerlukan faktor koreksi empiris. Ekspresi asli Branson mewakili rata-rata kekakuan terbobot untuk elemen retak dan utuh ( $E_c I$ ), sedangkan pendekatan yang diusulkan Bischoff mewakili rata-rata fleksibilitas terbobot ( $1/E_c I$ ). Pendekatan menggunakan rata-rata fleksibilitas terbobot dapat merepresentasikan reaksi lendutan komponen dengan lebih baik dengan retak-retak sepanjang bentang (Bischoff and Scanlon 2007).

Ekspresi berbasis penampang oleh Bischoff (2005) dimodifikasi sebagai berikut untuk memasukkan faktor tambahan  $\gamma$  untuk menghitung variasi kekakuan sepanjang bentang komponen.

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right) \left[ 1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \right]} \leq I_g \quad \text{dimana } M_a \geq M_{cr} \quad (7.3.2.2c)$$

Pendekatan ini memberikan perkiraan yang wajar dari lendutan balok beton dan pelat satu arah yang menggunakan tulangan FRP (Bischoff et al. 2009). Faktor  $\gamma$  bergantung pada beban dan kondisi batas serta memperhitungkan panjang daerah komponen yang tidak retak dan untuk memperhitungkan perubahan kekakuan pada daerah yang retak. Pada analisis yang lebih komprehensif seperti yang diusulkan pada Bischoff and Gross (2011), faktor ini dapat diambil sebesar  $\gamma = 1,72 - 0,72(M_{cr}/M_a)$ , yang merupakan hasil dari integrasi kurvatur sepanjang balok tumpuan sederhana dengan beban terdistribusi merata. Lendutan langsung harus dihitung dengan momen inersia efektif dari Persamaan (7.3.2.2c) menggunakan momen beban layan maksimum  $M_a$  pada komponen, kecuali bila nilai kekakuan didapat dari analisis yang lebih komprehensif. Lendutan komponen tertumpu menerus dapat diestimasi dengan menggunakan nilai rata-rata  $I_e$  yang dihitung pada bagian momen kritis positif dan negatif, seperti yang direkomendasikan ACI 318 dan ACI 435R. Untuk bentang dengan kedua ujung menerus, momen inersia efektif dapat diperkirakan sebesar  $I_e = 0,70 I_e + 0,15(I_{e1} + I_{e2})$ . Untuk bentang dengan satu ujung menerus,  $I_e$  dapat diperkirakan berdasarkan lokasi momen maksimum sepanjang bentang (DeSimone 2009).

Momen retak  $M_{cr}$  seperti yang ditentukan pada ACI 318, dan harus dihitung dengan menggunakan

$$M_{cr} = \frac{0,62 \lambda \sqrt{f_c} I_g}{y_t} \quad (7.3.2.2d)$$

Ketika  $M_a \geq M_{cr}$ , efek retak harus dipertimbangkan dengan menggunakan Persamaan (7.3.2.2c). Rekomendasi nilai ketebalan minimum pada tabel 7.3.2.1 mengasumsikan kondisi ini. Bila hasil perhitungan menghasilkan  $M_a < M_{cr}$  tetapi perbedaan antara kedua nilai ini kecil,

variabilitas yang melekat pada kekuatan tarik beton dan tahanan susut oleh tulangan masih dapat menyebabkan elemen retak. Dalam kasus seperti itu, lendutan akan secara signifikan diabaikan dengan penggunaan sifat penampang bruto. Perancang harus melakukan penilaian dan pertimbangan dampak proyek bila mengabaikan lendutan, apabila menentukan apakah dalam Persamaan (7.3.2.2c) harus digunakan dengan  $M_{cr} / M_a < 1,0$  untuk memberikan estimasi lendutan yang lebih konservatif.

### 7.3.2.3 Perhitungan lendutan (metode langsung)

Ketika lendutan dihitung dengan menggunakan ketentuan pada bagian ini, perancang harus membandingkan perhitungan lendutan dengan batas yang dapat diterima sebagai bagian dari kriteria desain proyek. Dalam banyak kasus, kriteria ditetapkan berdasarkan aturan gedung setempat.

Lendutan jangka pendek (lendutan seketika saat diberi beban layan) dari komponen lentur FRP satu arah dapat dihitung menggunakan momen inersia efektif dari balok yang menggunakan tulangan FRP dan teknik analisa struktur umum.

Besarnya lendutan jangka panjang dapat beberapa kali lipat dari lendutan jangka pendek, kedua lendutan ini pada pembebanan layan harus dipertimbangkan dalam desain. Peningkatan lendutan jangka panjang adalah fungsi dari geometri komponen (luas penampang batang dan ukuran elemen), karakteristik beban (umur beton pada saat pembebanan, dan besaran serta durasi pembebanan), dan karakteristik material (modulus elastisitas beton dan penulangan FRP, susut dan rangkai beton, pembentukan retak baru, dan pelebaran retak yang ada).

Data mengenai lendutan sebagai fungsi waktu dari komponen yang menggunakan batang FRP akibat susut dan rangkai mengindikasikan bahwa kurva lendutan-vs-waktu dari FRP dan elemen yang menggunakan batang baja memiliki bentuk dasar yang sama, yang mengindikasikan bahwa pendekatan yang sama untuk memperkirakan lendutan jangka panjang dapat digunakan (Brown1997).

Berdasarkan ACI 318, lendutan jangka panjang akibat susut dan rangkai  $\Delta_{(cp+sh)}$  dapat dihitung menggunakan persamaan berikut

$$\Delta_{(cp+sh)} = \lambda_{\Delta} (\Delta_i)_{sus} \tag{7.3.2.3a}$$

$$\lambda_{\Delta} = \frac{\xi}{1 + 50\rho'_f} \tag{7.3.2.3b}$$

Parameter  $\lambda_{\Delta}$  dalam Persamaan (7.3.2.3b) menjadi  $\xi$  karena tulangan tekan tidak diperhitungkan untuk komponen yang menggunakan batang FRP ( $\rho'_f = 0$ ). Nilai  $\xi$  dilaporkan dalam ACI 318.

Persamaan ini dapat digunakan untuk batang FRP dengan menggunakan modifikasi untuk memperhitungkan perbedaan kekakuan aksial dari batang untuk komponen beton yang menggunakan batang FRP, bila dibandingkan dengan komponen beton bertulang baja. Dengan FRP atau batang baja, rangkai beton menyebabkan pengurangan kekakuan efektif lentur  $E_cI$ . Secara sederhana, pengurangan ini dapat dianggap sebagai superposisi dari dua efek yang saling bertentangan. Efek pertama adalah penurunan modulus elastis efektif sebagai akibat langsung dari rangkai beton. Efek kedua adalah peningkatan tinggi sumbu netral yang dapat ditentukan dari analisis penampang elastis menggunakan modulus

elastisitas beton yang direduksi. Peningkatan tinggi sumbu netral ini mengarah ke peningkatan momen inersia efektif pada penampang retak. Bahwa peningkatan tinggi sumbu netral secara proporsional lebih signifikan untuk komponen yang menggunakan batang FRP daripada komponen yang menggunakan batang baja dapat ditunjukkan dari kekakuan aksial batang yang lebih rendah pada komponen beton yang menggunakan batang FRP. Sebagai hasilnya, peningkatan lendutan jangka panjang untuk beton bertulang FRP dapat diharapkan lebih kecil dari pada beton bertulang baja.

Brown (1997) mengamati bahwa defleksi balok yang menggunakan batang FRP tanpa batang tekan sebagai fungsi waktu selama periode pembebanan tetap selama 6 bulan adalah 60 persen hingga 90 persen dari defleksi awal. Tambahan defleksi fungsi waktu yang terukur hanya 50 persen hingga 75 persen dari defleksi yang disarankan oleh Persamaan (7.3.2.3a) dan (7.3.2.3b). Hasil yang sama telah dilaporkan oleh beberapa studi lain (Vijay et al. 1998; Arockiasamy et al. 1998) untuk gelas FRP (GFRP) dan karbon FRP (CFRP).

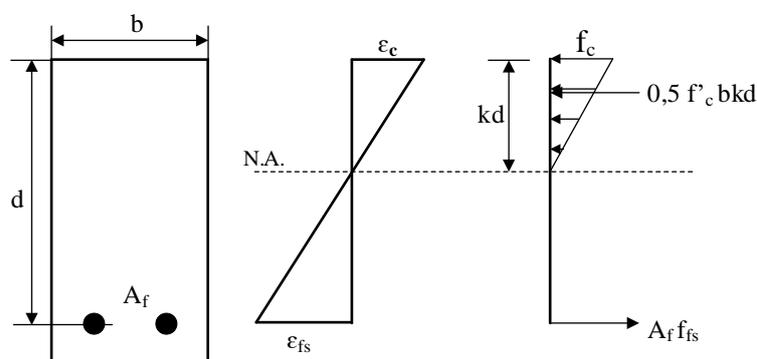
Berdasarkan tersebut di atas, faktor modifikasi dari 0,6 direkomendasikan untuk diterapkan pada Persamaan (7.3.2.3a). Untuk aplikasi tipikal, defleksi jangka panjang komponen yang menggunakan batang FRP dapat ditentukan dari Persamaan (7.3.2.3c)

$$\Delta_{(cp+sh)} = 0,6\zeta(\Delta_i)_{sus} \quad (7.3.2.3c)$$

Gross et al. (2003) mendapatkan bahwa untuk balok yang tidak retak akibat beban tetap, Persamaan (7.3.2.3c) akan menghasilkan pengali defleksi jangka panjang yang terlalu kecil (*underestimate*). Situasi ini terjadi pada penampang dimana sebagian besar beban layannya adalah beban tetap. Gross et al. (2003) menghubungkan adanya tambahan retak yang terjadi di balok dengan bertambahnya waktu pada beban tetap. Eksperimen lanjutan diperlukan untuk memvalidasi Persamaan (7.3.2.3c) untuk penerapan dengan beban tetap yang besar.

#### 7.4 Keruntuhan rangkai dan fatik

Untuk menghindari keruntuhan rangkai batang FRP di bawah tegangan tetap atau kegagalan akibat tegangan siklik dan fatik batang FRP, tingkat tegangan dalam batang FRP pada kondisi tegangan seperti ini harus dibatasi. Karena tingkat tegangan ini akan berada dalam kisaran elastis komponen, tegangan dapat dihitung melalui analisis elastis, seperti yang dijelaskan pada Gambar.7.4.



Gambar 7.4 – Distribusi tegangan - regangan elastik

##### 7.4.1 Batas tegangan keruntuhan rangkai

Untuk menghindari kegagalan komponen yang menggunakan batang FRP akibat keruntuhan rangkai FRP, pembatasan tegangan harus diterapkan pada batang FRP. Tingkat tegangan

**SNI 8970:2021**

pada batang FRP dapat dihitung menggunakan Persamaan (7.4.1), dengan  $M_{s,sus}$  sama dengan momen tidak terfaktor yang disebabkan oleh semua pembebanan tetap (beban mati dan sebagian beban hidup tetap)

$$f_{fs,sus} = M_{s,sus} \frac{n_f d (1-k)}{I_{cr}} \tag{7.4.1}$$

Momen inersia retak,  $I_{cr}$ , dan rasio tinggi sumbu netral efektif terhadap tinggi sumbu netral elastis,  $k$ , dihitung dengan Persamaan (7.3.2.2a) dan (7.3.2.2b).

Nilai untuk tingkat tegangan yang aman diberikan pada tabel 7.4.1. Nilai ini didasarkan pada batas tegangan keruntuhan rangkak yang disebutkan sebelumnya pada 4.3.1, dengan faktor keamanan sebesar 1/0,60.

**7.4.2 Batas tegangan fatik**

Jika struktur terkena batasan fatik, tegangan FRP harus dibatasi dengan nilai pada tabel 7.4.1. Tegangan FRP dapat dihitung dengan Persamaan (7.4.1), dengan menggantikan  $M_{s,sus}$  dengan momen akibat semua beban tetap ditambah momen maksimum yang diakibatkan siklus pembebanan fatik.

**Tabel 7.4.1 – Batas tegangan keruntuhan rangkak pada batang FRP**

Jenis Serat	GFRP	AFRP	CFRP
Batas tegangan keruntuhan rangkak $f_{fs,sus}$	0,20 $f_{fu}$	0,30 $f_{fu}$	0,55 $f_{fu}$

**8 Geser**

Desain beton bertulang yang menggunakan batang serat (FRP) - mirip dengan komponen beton bertulang baja. Akan tetapi, sifat-sifat mekanis yang berbeda dari batang FRP mempengaruhi kekuatan geser dan harus diperhatikan. Pasal ini membahas kekuatan geser balok dan pelat satu arah yang menggunakan batang FRP, penggunaan sengkang FRP, dan kapasitas geser pons dari pelat dua arah yang menggunakan batang FRP.

**8.1 Pertimbangan umum**

Beberapa masalah harus dipertimbangkan untuk desain geser elemen yang menggunakan batang FRP. FRP memiliki:

- 1) Modulus elastisitas yang relatif rendah;
- 2) Tahanan geser transversal rendah;
- 3) Kekuatan tarik tinggi dan tanpa titik leleh.

Juga, kekuatan tarik pada bagian FRP tertekuk jauh lebih rendah dari bagian yang lurus.

**8.1.1 Falsafah desain geser**

Desain geser batang FRP didasarkan pada metode desain kekuatan. Faktor reduksi kekuatan sebesar 0,75 yang ada di ACI 318 untuk menurunkan kapasitas geser nominal komponen beton bertulang baja harus digunakan juga untuk batang FRP. Kekuatan geser desain  $\phi V_n$

harus lebih besar dari gaya geser terfaktor  $V_u$  pada penampang yang ditinjau. Perhitungan gaya geser maksimum  $V_u$  pada bagian perletakan balok dapat diperoleh dari ACI 318.

## 8.2 Kekuatan geser komponen yang menggunakan batang FRP

Menurut ACI 318, kekuatan geser nominal dari penampang beton bertulang,  $V_n$ , adalah jumlah tahanan geser beton,  $V_c$ , dan tahanan geser dari baja,  $V_s$ .

Dibandingkan dengan penampang yang menggunakan batang baja dengan luas batang longitudinal yang sama, penampang yang menggunakan batang lentur FRP setelah retak memiliki tinggi sumbu netral yang lebih kecil karena kekakuan aksial yang lebih rendah (hasil perkalian dari luas batang dan modulus elastisitas). Daerah penampang tekan berkurang, dan lebar retak semakin besar. Akibatnya, tahanan geser yang disediakan oleh *interlock* agregat dan beton tertekan menjadi kecil. Penelitian mengenai kapasitas geser komponen lentur tanpa tulangan geser telah menunjukkan bahwa kekuatan geser beton dipengaruhi oleh kekakuan tarik tulangan lentur (Nagasaka et al. 1993; Zhao et al. 1995; Japan Society of Concrete Engineers 1997b; Sonobe et al. 1997; Michaluk et al. 1998; Tureyen and Frosch 2002, 2003).

Kontribusi batang FRP dalam aksi dowel belum diketahui. Namun, karena kekuatan dan kekakuan batang FRP yang lebih rendah pada arah melintang, diasumsikan bahwa kontribusi aksi dowel FRP lebih rendah, bila dibandingkan dengan penampang baja dengan luas yang setara. Penelitian lebih lanjut dibutuhkan untuk mengukur efek ini.

Kapasitas geser beton  $V_c$  dari komponen lentur menggunakan FRP sebagai tulangan utama dapat dievaluasi dengan

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w (kd) \quad (8.2a)$$

Parameter  $k$  dapat dihitung dengan Persamaan (8.3.2.2b).

Persamaan (8.2a) menjelaskan kekakuan aksial dari batang FRP melalui tinggi sumbu netral  $k_d$ , yang merupakan fungsi dari rasio tulangan  $\rho_f$  dan rasio modular  $n_f$ . Persamaan ini telah terbukti memberikan faktor keamanan yang cukup untuk spesimen yang menggunakan batang FRP untuk seluruh rentang rasio tulangan dan kekuatan beton yang telah diuji sampai saat ini (Tureyen dan Frosch 2003). Penelitian mengenai beton ringan yang menggunakan batang GFRP terbatas (Pantelides et al. 2012a, b). Berdasarkan percobaan ini, faktor reduksi  $\lambda = 0,80$  dalam hubungannya dengan Persamaan (8.2a) telah diusulkan untuk memprediksi kapasitas geser beton pasir ringan yang menggunakan batang GFRP (Liu and Pantelides 2013); sebagai alternatif, Teori *Modified Compression Field* dapat digunakan untuk memprediksi kapasitas geser (Liu and Pantelides 2012).

Persamaan (8.2a) dapat ditulis ulang sebagai Persamaan (8.2b). Bentuk persamaan ini menunjukkan Persamaan (8.2a) hanyalah persamaan geser ACI 318 untuk batang baja yang dimodifikasi oleh faktor  $([5/2]k)$ , yang memperhitungkan kekakuan aksial dari batang FRP.

$$V_c = \left( \frac{5}{2} k \right) 2 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (8.2b)$$

Metode ACI 318 yang digunakan untuk menghitung kontribusi geser tulangan sengkang masih dapat diaplikasikan ketika FRP digunakan sebagai tulangan geser. Tahanan geser yang diberikan sengkang FRP tegak lurus dengan sumbu komponen,  $V_f$ , dapat ditulis sebagai

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} \quad (8.2c)$$

Tingkat tegangan pada tulangan geser FRP harus dibatasi untuk mengontrol lebar retak geser dan menjaganya integritas geser beton dan untuk mencegah kegagalan pada bagian tertekuk pada sengkang FRP (Persamaan 6.2.1). Persamaan 8.2d memberikan tingkat tegangan ultimit pada FRP untuk digunakan dalam desain.

$$f_{fv} = 0,004E_f \leq f_{fb} \quad (8.2d)$$

Bila menggunakan tulangan geser yang tegak lurus terhadap sumbu komponen, spasi dan luas penampang yang dibutuhkan tulangan geser dapat dihitung dengan Persamaan (8.2e).

$$\frac{A_{fv}}{s} = \frac{(V_u - \phi V_c)}{\phi f_{fv} d} \quad (8.2e)$$

Bila sengkang miring FRP digunakan sebagai tulangan geser, Persamaan (8.2f) dapat digunakan untuk menghitung kontribusi dari sengkang FRP.

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} (\sin \theta + \cos \theta) \quad (8.2f)$$

Bila FRP spiral segi empat menerus digunakan sebagai tulangan geser (dalam kasus ini,  $s$  adalah spasi, dan  $\theta$  adalah sudut kemiringan spiral), Persamaan (8.2g) memberikan kontribusi FRP spiral.

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} (\sin \theta) \quad (8.2g)$$

Pola kegagalan geser elemen yang menggunakan FRP sebagai tulangan geser dapat diklasifikasi menjadi dua tipe (Nagasaka et al.1993): pola kegagalan tarik-geser (dikontrol oleh runtuhnya tulangan geser FRP) dan pola kegagalan tekan-geser (dikontrol oleh remuknya beton bagian badan (*web*)). Pola pertama lebih getas dan pola yang terakhir menghasilkan defleksi yang lebih besar. Hasil eksperimental telah menunjukkan bahwa pola kegagalan tergantung pada indeks tulangan geser  $\rho_{fv} E_f$ , dimana  $\rho_{fv}$  adalah rasio tulangan geser FRP sebesar  $A_{fv}/b_w s$ . Ketika nilai  $\rho_{fv} E_f$  meningkat, kapasitas geser pada tegangan geser meningkat, dan pola kegagalan berubah dari geser tarik menjadi geser tekan.

### 8.2.1 Batas regangan tarik tulangan geser

Asumsi desain bahwa kapasitas beton dan tulangan saling menambahkan adalah akurat jika retak geser dikontrol dengan memadai. Oleh sebab itu, regangan tarik tulangan geser FRP harus dibatasi untuk memastikan bahwa pendekatan desain ACI dapat diterapkan.

CAN/CSA-S6-06 membatasi regangan tarik pada tulangan geser FRP sebesar 0,002 mm/mm. disadari bahwa nilai regangan ini (sesuai dengan regangan leleh baja 420) mungkin sangat konservatif. Bukti eksperimental menunjukkan bahwa selalu didapatkan nilai regangan yang lebih tinggi (Wang1998; Zhao et al. 1995; Okamoto et al. 1994). Ketentuan *Eurocrete Project* membatasi nilai regangan geser batang FRP dengan 0,0025 mm/mm (Dowden dan Dolan 1997). Dalam semua hal, regangan efektif pada tulangan geser FRP tidak boleh melebihi 0,004, demikian juga kekuatan desain tidak boleh melebihi kekuatan bagian tertekuk dari sengkang,  $f_{fb}$ . Ahmed et al. (2010a,b) melaporkan bahwa menggunakan nilai 0,004

menghasilkan prediksi tahanan geser komponen beton yang lebih akurat tapi konservatif untuk penulangan sengkang GFRP. Nilai 0,004 diperkanankan sebagai regangan yang mencegah degradasi *interlock* agregat dan geser beton (Priestley et al. 1996). CAN/CSA-S6S1-10 mengambil batas 0,004 dalam desain geser elemen beton yang menggunakan tulangan sengkang FRP.

### 8.2.2 Tulangan geser minimum

ACI 318 membutuhkan tulangan geser minimum ketika  $V_u$  melebihi  $\phi V_c/2$ . Persyaratan ini dibutuhkan untuk mencegah kegagalan geser komponen ketika terjadinya retak tiba-tiba yang dapat menimbulkan tegangan yang berlebihan (*Joint ACI-ASCE Committee 426 1973*). Untuk mencegah kegagalan geser yang getas, harus disediakan kekuatan cadangan yang memadai untuk memastikan faktor keamanan yang sama dengan ketentuan ACI 318 untuk batang baja. Persamaan (8.2.2) memberikan rekomendasi minimum tulangan geser FRP

$$A_{fv,min} = 0,35 \frac{b_w s}{f_{fv}} \quad (8.2.2)$$

Dengan  $b_w$  dan  $s$  (mm), dan  $f_{fv}$  dalam MPa.

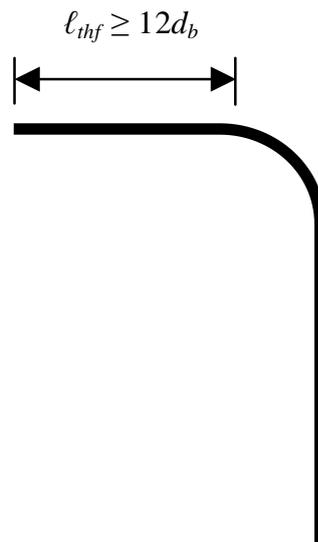
Nilai tulangan minimum yang diberikan pada Persamaan (8.2.2) tidak bergantung pada kekuatan beton. Jika sengkang baja digunakan, nilai tulangan minimum memberikan tahanan geser yang bervariasi dari  $1,50V_c$  untuk  $f_c'$  sebesar 17 MPa dan  $1,25V_c$  ketika  $f_c'$  sebesar 69 MPa. Persamaan (8.2.2) yang diturunkan untuk komponen dengan batang baja, lebih konservatif bila digunakan pada elemen yang menggunakan batang FRP. Sebagai contoh, ketika diaplikasikan pada elemen lentur yang menggunakan tulangan longitudinal GFRP, kekuatan geser yang diberikan oleh Persamaan (8.2.2) dapat melebihi  $3V_c$ . Rasio kekuatan geser yang disediakan oleh Persamaan (8.2.2) untuk  $V_c$  akan berkurang ketika kekakuan tulangan longitudinal meningkat atau ketika kekuatan tekan beton meningkat.

### 8.2.3 Kruntuhan geser akibat pecahnya badan (*web*)

Studi oleh Nagasaka et al. (1993) menunjukkan bahwa untuk penampang yang menggunakan batang FRP, transisi dari batas kondisi runtuh menjadi hancur beton terjadi pada nilai rata-rata  $V_c$  sebesar  $0,3f_c' b_w d$ , namun dapat terjadi pada nilai serendah  $0,18f_c' b_w d$ . Ketika  $V_c$  lebih kecil dari  $0,18f_c' b_w d$ , tarik geser dapat terjadi, sedangkan ketika  $V_c$  melebihi  $0,3f_c' b_w d$ , kehancuran beton dapat terjadi. Korelasi antara batas kondisi runtuh dan hancur beton tidak dimengerti seutuhnya, dalam hal ini direkomendasikan untuk menggunakan batas ACI 318  $8\sqrt{f_c'} b_w d$  daripada menggunakan  $0,3f_c' b_w d$ . Kenyataannya, batasan ACI ditujukan untuk mengendalikan lebar retak berlebih dan di bawah nilai hancurnya *web*.

### 8.3 Pendetailan sengkang geser

Jarak maksimum sengkang baja vertikal yang diberikan dalam ACI 318 sebagai terendah antara  $d/2$  atau 600 mm digunakan pada tulangan geser vertikal FRP. Batas ini memastikan bahwa setiap retak geser ditahan setidaknya oleh satu sengkang. Pengujian oleh Ehsani et al. (1995) mengindikasikan bahwa untuk spesimen dengan  $r_b/d_b$  sebesar nol, tulangan geser gagal pada level pembebanan yang sangat rendah pada bengkokan sengkang. Oleh sebab itu, meskipun pembuatan batang FRP dengan bengkokan yang tajam memungkinkan, detail seperti itu harus dihindari. Direkomendasikan rasio  $r_b/d_b$  minimum sebesar 3. Sebagai tambahan, sengkang FRP harus ditutup dengan kait 90 derajat.



**Gambar 8.3 – Kebutuhan panjang ujung kait untuk sengkang FRP**

Ketentuan ACI 318 untuk lekatan kait baja tidak dapat diterapkan secara langsung pada batang FRP karena sifat mekaniknya yang berbeda. Gaya tarik pada kaki sengkang dipindahkan ke beton melalui ujung di luar kait, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.3. Ehsani et al. (1995) menemukan bahwa untuk panjang ujung kait  $l_{lhf}$  melebihi  $12d_b$ , tidak terjadi slip yang signifikan dan tidak mempengaruhi kekuatan tarik pada kaki sengkang. Oleh sebab itu, panjang ujung kait sebesar  $12d_b$  harus digunakan.

#### 8.4 Kekuatan geser slab beton dua arah dengan batang FRP

Bukti eksperimental (Ahmad et al. 1993; Bank and Xi 1995; Banthia et al. 1995; Matthys and Taerwe 2000; El-Ghandour et al. 2003; Ospina et al. 2003) menunjukkan bahwa kekakuan aksial batang FRP dan kekuatan tekan beton  $f_c'$ , secara signifikan mempengaruhi respon geser transversal dari sambungan kolom-pelat dua arah dengan batang FRP. Hasil pengujian spesimen pelat dua arah terisolasi yang menggunakan batang FRP yang memikul beban gravitasi terbagi rata mengindikasikan bahwa dengan meningkatnya kekakuan anyaman FRP bagian atas dapat meningkatkan kapasitas geser pons dan menurunkan defleksi ultimit *slab*. Kegagalan geser pons (*punching shear*) pada pelat dua arah yang menggunakan batang FRP terjadi secara tiba-tiba dan getas. Sebaliknya, hasil uji pons (Bank and Xi 1995; Ospina et al. 2003) menunjukkan bahwa pelat dua arah yang menggunakan *grid* FRP tidak menunjukkan penurunan beban yang tajam pada kegagalan pons. Hal ini berbeda dengan pelat yang menggunakan FRP bentuk batang. Sebaliknya, FRP terus menyerap energi dalam pola stabil setelah kegagalan awal. Hassan et al. (2013a) melaporkan bahwa peningkatan rasio tulangan menghasilkan kapasitas geser pons yang lebih tinggi, tulangan dan regangan beton yang lebih rendah, dan lendutan yang lebih kecil. Selain itu, penggunaan beton mutu tinggi meningkatkan kapasitas geser pons, secara signifikan mengurangi regangan beton, meningkatkan regangan batang GFRP, dan mengurangi lendutan akibat kekuatan tarik dan modulus elastisitas yang tinggi.

Evaluasi statistik hasil pengujian mengungkapkan bahwa model desain geser satu arah yang diusulkan oleh Tureyen dan Frosch (2003), yang memperhitungkan kekakuan tulangan dapat dimodifikasi (Ospina 2005) untuk memperhitungkan transfer geser pada pelat beton dua arah. Modifikasi menghasilkan Persamaan (8.4a), yang dapat digunakan untuk menghitung kapasitas geser pons konsentris dari pelat beton dua arah dengan batang FRP yang didukung oleh kolom interior atau mengalami beban terkonsentrasi yang berbentuk persegi atau bundar

$$V_c = \frac{4}{5} \sqrt{f'_c} b_o (kd) \quad (8.4a)$$

Parameter  $k$  dapat dievaluasi menggunakan Persamaan (7.3.2.2b).

Dalam evaluasi Persamaan (8.4a),  $b_o$  harus dihitung  $d/2$  dari muka kolom. Selain itu, bentuk permukaan kritis harus sama dengan bentuk kolom.

Persamaan (8.4a) dapat ditulis dalam bentuk Persamaan (8.4b). Persamaan ini adalah persamaan dasar geser pons terkonsentrasi dari ACI 318 untuk *slab* bertulangan baja  $V_c$  dimodifikasi dengan faktor  $([5/2]k)$  yang memperhitungkan kekakuan aksial dari batang FRP.

$$V_c = \left(\frac{5}{2}k\right) 4\sqrt{f'_c} b_o d \quad (8.4b)$$

Persamaan (8.4a) memberikan faktor keamanan yang cukup untuk slab dua arah yang menggunakan batang FRP untuk seluruh rentang rasio tulangan dan kekuatan beton yang diuji. Hasil eksperimen dan rekomendasi desain tahanan geser dari pelat dua arah yang menggunakan batang FRP dapat ditemukan dalam literatur (CAN/CSA S806-12 2012; Lee et al. 2009; Dulude et al. 2013; Hassan et al. 2013b). Penelitian lebih lanjut dibutuhkan untuk memeriksa kapasitas geser pons dari pelat dua arah yang menggunakan batang FRP dengan tumpuan kolom tepi dan sudut, serta efek dari bentuk segi empat kolom dan transfer momen tidak setimbang pada kapasitas geser pons pelat beton dua arah yang menggunakan batang FRP tertumpu pada kolom interior.

## 9 Tulangan susut dan suhu

Tulangan susut dan penulangan suhu ditujukan untuk membatasi lebar retak yang ditentukan oleh kekakuan dan kekuatan batang tulangan. Retak susut yang tegak lurus terhadap bentang komponen ditahan oleh tulangan lentur, oleh karena itu, tulangan susut dan penulangan suhu hanya diperlukan dalam arah yang tegak lurus terhadap bentang. ACI 318 mensyaratkan rasio tulangan baja minimum 0,0020 ketika menggunakan tulangan baja ulir Mutu 280 atau 320, dan 0,0018 saat menggunakan tulangan ulir Mutu 420 atau tulangan las (ulir atau polos). ACI 318 juga mensyaratkan bahwa jarak tulangan susut dan penulangan suhu tidak melebihi lima kali ketebalan komponen atau 500 mm.

### 9.1 Rasio batang FRP minimum

Tidak ada data eksperimental yang tersedia untuk rasio batang FRP minimum untuk susut dan penulangan suhu. ACI 318, Bagian 7.12.2, menyatakan bahwa untuk pelat dengan batang baja yang memiliki tegangan leleh melebihi 420 MPa yang diukur pada regangan leleh 0,0035, rasio tulangan terhadap luas penampang bruto beton setidaknya  $0,0018 \times 420/f_y$ , dimana  $f_y$  dalam satuan MPa, namun tidak kurang dari 0,0014. Kekakuan dan kekuatan susut dan suhu batang FRP dapat dimasukkan dalam formula ini. Oleh karena itu, ketika tulangan susut dan suhu FRP digunakan, jumlah tulangan harus ditentukan dengan menggunakan Persamaan (9.1)

$$\rho_{f,ts} = 0,0018 \times \frac{414 E_s}{f_{fu} E_f} \quad (9.1)$$

Karena pengalaman yang terbatas, direkomendasikan bahwa rasio tulangan susut dan suhu diberikan oleh Persamaan (9.1) diambil tidak kurang dari 0,0014, yang merupakan nilai minimum yang ditentukan oleh ACI 318 untuk batang baja susut dan suhu. Perancang profesional bersertifikat dapat mempertimbangkan batas atas untuk rasio tulangan susut dan suhu sebesar 0,0036, atau menghitung rasio berdasarkan tingkat regangan yang dihitung sesuai dengan kapasitas lentur nominal sebagai pengganti penggunaan Persamaan (9.1). Jarak batang FRP untuk susut dan suhu tidak boleh melebihi tiga kali ketebalan *slab* atau 300 mm, dan diambil nilai terendah. Penggunaan tulangan susut dan suhu untuk FRP pelat yang tertumpu di atas tanah disajikan pada Lampiran A.

## 10 Penyaluran dan sambungan lewatan tulangan

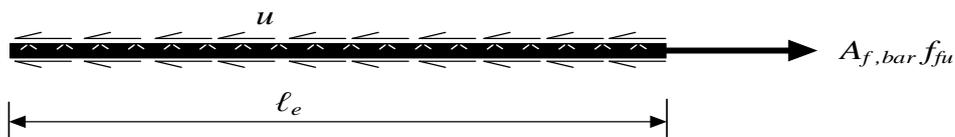
Pada komponen lentur beton bertulang, gaya tarik yang dipikul tulangan diimbangi oleh gaya tekan beton. Gaya tarik disalurkan ke tulangan melalui lekatan antara tulangan dengan beton disekitarnya. Tegangan lekatan muncul setiap kali gaya didalam tulangan tarik berubah. Lekatan antara tulangan FRP dan beton disalurkan melalui mekanisme yang sama dengan tulangan baja dan bergantung pada jenis FRP, modulus elastisitas, deformasi permukaan dan bentuk batang FRP (Al-Zahrani et al.1996; Uppuluri et al. 1996; Gaoet al. 1998b).

### 10.1 Penyaluran tegangan pada tulangan lurus

Gambar 10.1 menunjukkan kondisi balans dari batang FRP dengan panjang  $\ell_e$  yang tertanam pada beton. Gaya pada batang ditahan oleh tegangan lekatan rata-rata  $u$  bekerja pada permukaan batang. Keseimbangan gaya-gaya dapat ditulis seperti berikut

$$\ell_e \pi d_b u = A_{f,bar} f_f \quad (10.1a)$$

dengan  $f_f$  adalah tegangan yang terjadi pada ujung panjang batang yang tertanam. Berbeda dengan batang baja, kekuatan penuh dari batang FRP tidak perlu penyaluran, terutama ketika kapasitas lentur dikontrol oleh hancurnya beton dan tegangan yang diperlukan pada tulangan saat runtuh kurang dari kekuatan ultimit yang dijamin. Selain itu, mengubah kondisi batas dari rusaknya tulangan atau hancurnya beton menjadi kegagalan lekatan tidak secara signifikan mengubah daktilitas yang terkait dengan kegagalan.



**Gambar 10.1 – Transfer gaya melalui lekatan**

Persamaan panjang penyaluran untuk tulangan baja yang ditemukan di ACI 318 didasarkan pada riset yang dilakukan oleh Orangun et al. (1977). Persamaan panjang penyaluran didasarkan pada 62 uji sambungan tanam tanpa kekangan dan 54 uji sambungan tanam terkekang yang gagal dengan terbelahnya beton. Orangun et al. (1977) mengembangkan persamaan menghubungkan tegangan lekatan rata-rata yang dinormalisasi oleh akar kuadrat dari kekuatan tekan beton dengan normalisasi dari selimut beton ke tengah batang  $C/d_b$  dan panjang sambungan tanam yang dinormalisasi  $d_b/\ell_e$  menggunakan regresi linear. Persamaan ini berfungsi sebagai dasar untuk persamaan panjang penyaluran untuk batang baja yang ditemukan di ACI 318.

Metodologi serupa diikuti oleh Wambeke dan Shield (2006) dari konsolidasi *database* 269 uji lekatan balok yang dibuat. Basis data terbatas pada uji balok-ujung, uji *notch-beam*, dan uji sambungan tanam. Mayoritas batang yang diwakili dalam data terdiri dari FRP serat gelas

(GFRP). Dalam database Wambeke dan Shield (2006), ada 82 uji balok yang menghasilkan kegagalan tarik belah berdasarkan hasil kerja Ehsani et al. (1996a), Daniali (1992), Shield et al. (1997, 1999), dan Tighiouart et al. (1999). Pengujian meliputi permukaan batang berpola spiral dan heliks dengan dan tanpa kekangan. Regresi linear dari tegangan lekatan rata-rata yang dinormalisasi versus selimut dan panjang tertanam yang dinormalisasi menghasilkan hubungan berikut setelah pembulatan koefisien

$$\frac{u}{0,083\sqrt{f_c}} = 4,0 + 3,0 \frac{C}{d_b} + 100 \frac{d_b}{\ell_e} \quad (10.1b)$$

Dengan  $C$  adalah yang terkecil di antara jarak selimut ke titik berat batang ( $d_c$  atau  $d_{c,side}$ ) atau setengah dari spasi antara titik berat batang lainnya yang disalurkan. Permukaan batang (pola spiral versus heliks) tampaknya tidak mempengaruhi hasil, efek pengekangan juga tidak berpengaruh (Wambeke dan Shield 2006). Darwin et al. (1996) menemukan bahwa baja pengekang yang digunakan pada balok yang memiliki batang baja dengan luas sirip relatif lebih tinggi memiliki peningkatan kekuatan lekatan yang lebih menguntungkan daripada batang baja ukuran sama dengan luas sirip sedang. Batang GFRP memiliki luas sirip relatif sangat rendah dan, oleh karena itu, keberadaan pengekang mungkin tidak meningkatkan tegangan lekatan rata-rata. Namun, penelitian tambahan tentang efek pengekang dari tulangan pada lekatan batang GFRP perlu dilakukan.

Persamaan (10.1a) dan (10.1b) dapat diselesaikan untuk tegangan batang yang ada dengan adanya panjang tertanam dan selimut. *Subset* acak dari *database* lengkap yang dikembangkan oleh Wambeke dan Shield (2006) digunakan untuk menentukan faktor keamanan untuk digunakan dengan persamaan ini. Probabilitas yang dihasilkan dari rasio uji-prediksi kurang dari 1,0 adalah 22 persen. Basis data ini mencakup kegagalan belah dan tercabut dengan panjang tertanam setidaknya  $19d_b$ . Selain itu, batas 3,5 diberikan pada  $C/d_b$  sehingga persamaan yang sama dapat digunakan untuk memprediksi tegangan batang yang dapat disalurkan untuk mode kegagalan belah atau tercabut. Ketika selimut beton yang dinormalisasi lebih dari 3,5 dan panjang tertanam lebih besar dari  $19d_b$ , mode kegagalan selalu tercabut. Persamaan yang dihasilkan untuk peenyaluran tegangan batang adalah

$$f_{fe} = \frac{0,0083\sqrt{f_c}}{\alpha} \left( 13,6 \frac{\ell_e}{d_b} + \frac{C}{d_b} \frac{\ell_e}{d_b} + 340 \right) \leq f_{fu} \quad (10.1c)$$

Dengan  $C/d_b$  tidak boleh diambil lebih besar dari 3,5, dan  $\alpha$  adalah faktor lokasi batang (dibahas pada 10.1.1). Rasio uji-prediksi tegangan tulangan rata-rata dengan menggunakan persamaan ini adalah 1,14, dengan koefisien variasi 15,8 persen. Persamaan ini tidak digunakan untuk panjang tertanam yang lebih besar dari  $100d_b$ , karena data yang digunakan untuk mengembangkannya tidak mengikutsertakan kegagalan lekatan apapun dengan panjang tertanam lebih besar dari  $100d_b$ . Panjang tertanam lebih pendek dari  $20d_b$  tidak disarankan. Perlu pekerjaan tambahan untuk menentukan efek faktor keamanan lekatan yang dipilih pada perencanaan keandalan lentur elemen.

Bila menggunakan Persamaan (10.1c) untuk tujuan desain, perlu diasumsikan tegangan batang maksimum yang dapat dicapai bervariasi secara linear dari 0 hingga nilai yang dihasilkan oleh Persamaan (10.1c) sepanjang  $20d_b$  pertama dari batang tertanam. Setelah titik ini, Persamaan (10.1c) dapat digunakan untuk menentukan tegangan batang yang dapat dicapai di sepanjang batang. Pemeriksaan harus dilakukan untuk menentukan apakah kapasitas momen yang memadai dapat dicapai pada akhir panjang tertanam yang tersedia. Jika tidak, maka panjang tertanam harus ditambahkan, jumlah batang ditambahkan sehingga tegangan lebih rendah di setiap batang diperlukan pada kondisi ultimit, atau kapasitas momen nominal harus dihitung ulang untuk memasukkan kemungkinan kegagalan lekatan, seperti

## SNI 8970:2021

yang dijelaskan dalam 10.1.3. Perhatikan bahwa meningkatkan jumlah batang dapat mengurangi pengembangan tegangan pada batang, karena  $C/d_b$  berkurang akibat berkurangnya jarak batang.

### 10.1.1 Faktor modifikasi lokasi tulangan

Faktor modifikasi lokasi tulangan standar adalah 1. Ketika mengecor beton, udara, air, dan agregat bergerak ke lapisan atas dalam beton. Hal ini dapat menyebabkan penurunan kekuatan lekatan yang signifikan pada bagian bawah batang horisontal. Istilah 'batang atas' biasanya mengacu pada batang horisontal dengan selimut beton sebesar 300 mm di bawah batang pada saat pengecoran. Basis data yang dikumpulkan oleh Wambeke dan Shield (2006) mencakup 15 pengujian menggunakan batang atas dengan panjang tertanam lebih besar dari  $16d_b$  yang gagal pada lekatan (Ehsani et al. 1996a; Mosley 2002). Berdasarkan data ini, untuk batang dengan selimut beton lebih tebal dari 300mm,  $\alpha$  dalam Persamaan (10.1c) harus diambil sebesar 1,5.

### 10.1.2 Faktor modifikasi material

Jumlah data lekatan yang terbatas tersedia pada data Wambeke dan Shield (2006) untuk batang FRP aramid (AFRP) (Mosley 2002). Namun berdasarkan data pengujian ini, panjang penyaluran batang AFRP tampaknya sama dengan GFRP. Oleh karena itu, persamaan panjang penyaluran yang disediakan, juga cocok untuk AFRP tanpa adanya faktor modifikasi material. Tidak ada data yang tersedia untuk CFRP. Karena kekakuan CFRP yang lebih besar, mungkin panjang penyaluran yang dibutuhkan akan berkurang, demikian juga faktor modifikasi materialnya. Pada saat ini, faktor material sebesar 1 direkomendasikan untuk batang CFRP.

### 10.1.3 Kekuatan momen nominal untuk lekatan pada bagian kritis

Bagian lekatan kritis didefinisikan sebagai bagian di mana tegangan maksimum yang dapat dicapai di batang FRP dibatasi oleh Persamaan (10.1c). Untuk kasus ini, kapasitas momen nominal harus dihitung ulang menggunakan modifikasi metode yang dijelaskan dalam 7.2. Ketika lekatan membatasi tegangan yang dapat disalurkan ke batang, dua kemungkinan kondisi batas adalah hancurnya beton dan kegagalan lekatan. Kapasitas untuk keadaan batas hancurnya beton dapat dihitung menggunakan Persamaan (7.2.2e). Persamaan ini berlaku jika tegangan batang yang dapat disalurkan ( $f_{fe}$  sebagaimana ditentukan dari Persamaan (10.1c)) lebih besar dari atau sama dengan tegangan tulangan yang ditentukan oleh Persamaan (7.2.2d). Ketika  $\rho_f \leq \rho_{fb}$  atau  $\rho_f > \rho_{fb}$  dan tegangan tulangan diperlukan dalam Persamaan (7.2.2d) tidak dapat disalurkan, kapasitas untuk batas kegagalan lekatan dapat ditentukan menggunakan Persamaan (7.2.2g) dengan  $f_{fe}$  dari Persamaan (10.1c) menggantikan  $f_{fu}$ , dan  $f_{fe}/E_f$  disubstitusi untuk  $\epsilon_{fu}$  di Persamaan (7.2.2j). Faktor reduksi kekuatan 0,55 direkomendasikan untuk lentur ketika batasnya adalah kegagalan lekatan

## 10.2 Panjang penyaluran tulangan yang dibengkokkan

Data eksperimental mengenai perilaku lekatan batang kait FRP terbatas. Ketentuan ACI 318 mengenai panjang penyaluran untuk batang kait baja tidak dapat diterapkan pada batang FRP karena perbedaan karakteristik bahan. Ehsani et al. (1996b) menguji 36 spesimen dengan batang kait FRP kait. Berdasarkan hasil penelitian, ekspresi untuk panjang penyaluran dari batang kait 90 derajat  $\ell_{bhf}$  diusulkan seperti berikut

$$\ell_{bhf} = K_4 \frac{d_b}{\sqrt{f_c}} \quad (10.2a)$$

Faktor  $K_4$  untuk perhitungan panjang penyaluran persamaan ini adalah 150 untuk batang dengan  $f_{fu}$  lebih kecil dari 520 MPa. Faktor ini harus dikalikan dengan  $f_{fu}/517$  untuk batang dengan kekuatan tarik antara 520 dan 1040 MPa.

Ketika selimut beton samping (normal pada bidang kait) lebih dari 64 mm dan selimut beton di ujung kait tidak kurang dari 50 mm, pengali sebesar 0,7 dapat diaplikasikan (Ehsani et al. 1996b). Faktor modifikasi ini serupa dengan di ACI 318, bagian 12.5.3, untuk batang kait baja. Untuk menjelaskan kurangnya data eksperimental, penggunaan Persamaan (10.2b) dalam menghitung panjang penyaluran batang kait direkomendasikan

$$\ell_{bhf} = \begin{cases} 165 \frac{d_b}{\sqrt{f_c'}} & \text{untuk } f_{fu} \leq 520 \text{ MPa} \\ 3,1 \frac{f_{fu}}{\sqrt{f_c'}} \frac{d_b}{\sqrt{f_c'}} & \text{untuk } 520 < f_{fu} < 1040 \text{ MPa} \\ 330 \frac{d_b}{\sqrt{f_c'}} & \text{untuk } f_{fu} \geq 1040 \text{ MPa} \end{cases} \quad (10.2b)$$

Dengan  $\ell_{bhf}$  dan  $d_b$  dalam mm dan  $f_{fu}$  dan  $f_c'$  dalam MPa.

Nilai yang dihitung dengan Persamaan (10.2b) tidak boleh kurang dari  $12d_b$  atau 230 mm. Nilai ini berdasar pada hasil pengujian yang dilaporkan oleh Ehsani et al. (1995), dimana gaya tarik dan slip dari batang kait stabil mendekati  $12d_b$ . Panjang ujung batang kait,  $\ell_{thf}$  (Gambar 8.3), tidak boleh kurang dari  $12d_b$ . Panjang ujung yang lebih panjang diketahui tidak memberikan pengaruh signifikan pada gaya tarik ultimit dan slip dari kait. Untuk menghindari kegagalan geser pada bagian bengkokan, jari-jari bengkokan tidak boleh kurang dari  $3d_b$  (Ehsani et al. 1995).

### 10.3 Penyaluran tulangan momen positif

Secara umum, persyaratan dari 12.10 dan 12.11 ACI 318 harus dipenuhi bila menggunakan tulangan FRP dengan perubahan sebagai berikut: untuk batang lurus, tegangan yang disalurkan  $f_{fr}$  harus nilai minimum dari  $f_{fu}$ , tegangan yang diberikan pada Persamaan (7.2.2d), dan tegangan yang diberikan Persamaan (11.1c). Panjang penyaluran untuk batang lurus didefinisikan sebagai panjang lekatan yang dibutuhkan untuk menyalurkan  $f_{fr}$  dan sebesar

$$\ell_d = \frac{\alpha \frac{f_{fr}}{0,083\sqrt{f_c'}} - 340}{13,6 + \frac{C}{d_b}} d_b \quad (10.3a)$$

Dengan  $C$  adalah nilai terkecil dari jarak selimut ke tengah tulangan ( $d_c$  atau  $d_{c,side}$ ) atau setengah jarak titik tengah antar batang. Karena faktor reduksi kekuatan yang dibandingkan dengan baja, ketentuan untuk penyaluran tulangan positif pada titik belok dan tumpuan sederhana diberikan pada ACI 318, bagian 12.11.3, harus diubah menjadi

$$\ell_d \leq \frac{\phi M_n}{V_u} + \ell_a \quad (10.3b)$$

## SNI 8970:2021

Dengan  $M_n$  adalah momen nominal dengan asumsi semua tulangan mengalami tegangan sebesar tegangan tulangan yang dibutuhkan  $f_{fr}$ ;  $V_u$  adalah kekuatan geser terfaktor; dan  $\ell_a$ , pada tumpuan, adalah panjang tertanam di luar pusat tumpuan, atau  $\ell_a$ , pada titik belok, adalah yang terbesar dari tinggi efektif komponen atau  $12d_b$ . Nilai  $\phi M_n/V_u$  dapat ditingkatkan hingga 30 persen ketika bagian ujung tulangan terkekang oleh reaksi tekan. Pembatasan panjang penyaluran ini tidak perlu dipenuhi jika dapat ditunjukkan dengan analisis bahwa kapasitas momen desain lebih besar dari momen terfaktor di sepanjang panjang penyaluran.

### 10.4 Sambungan lewatan tarik

ACI 318, bagian 12.15, membedakan antara dua jenis sambungan lewatan tarik, tergantung pada fraksi batang yang disambung dalam panjang tertentu dan pada tegangan tulangan pada sambungan. Untuk tulangan baja, panjang sambungan untuk sambungan Kelas A adalah  $1,0\ell_d$ , dan untuk sambungan Kelas B adalah  $1,3\ell_d$ . klasifikasi ini tidak sesuai untuk aplikasi di FRP, karena seringkali kekuatan tarik penuh dari batang tidak perlu disalurkan; oleh sebab itu, asumsi bahwa semua sambungan adalah sambungan Kelas B adalah konservatif. Data yang terbatas tersedia untuk panjang penyaluran minimum dari sambungan tarik FRP (Benmokrane 1997; Mey 2002). Akibatnya, nilai  $1,3\ell_d$  direkomendasikan untuk semua sambungan.

## 11 Contoh desain

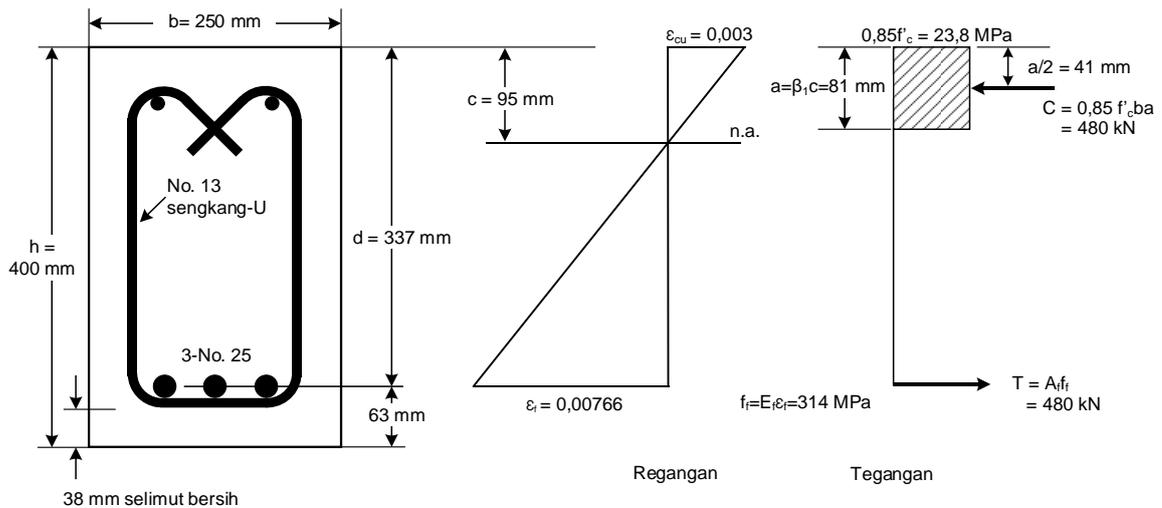
Serangkaian contoh desain disediakan untuk menggambarkan konsep dan prosedur desain yang disajikan sebelumnya dalam tata cara desain ini. Contoh-contoh telah dikembangkan menjadi mirip dengan contoh yang disajikan dalam publikasi *Portland Cement Association (PCA), Notes on ACI318-08 Building Code Requirements for Structural Concrete (Portland Cement Association 2008)*. Dalam beberapa kasus, pernyataan masalah identik. Dalam kebanyakan kasus, modifikasi sederhana telah dibuat dari PCA (2008) asli. Catatan pernyataan masalah untuk membuatnya lebih cocok untuk digunakan sebagai contoh untuk beton yang diperkuat FRP. Diperkirakan bahwa contoh-contoh tambahan akan ditambahkan, karena ketentuan baru dikembangkan untuk edisi mendatang dari tata cara desain ini. Contoh-contoh disajikan pertama kali dalam satuan SI.

Sifat material diberikan untuk beton dan perkuatan dalam pernyataan masalah untuk setiap contoh. Sifat material umumnya reflektif dari perkuatan FRP gelas (GFRP) karena ini adalah bahan perkuatan FRP yang paling umum digunakan untuk perkuatan internal saat ini. Seperti disebutkan dalam 4.2.1, kekuatan tarik ultimit ( $f_{ju}^*$ ) yang dijamin dari perkuatan biasanya bervariasi dengan ukuran batang untuk pabrikan tertentu, dengan perkuatan yang lebih kecil memiliki kekuatan yang lebih tinggi. Untuk kesederhanaan, variasi ini diabaikan dalam contoh yang disajikan di sini, dan kekuatan tarik diambil sebagai nilai tunggal terlepas dari diameter batang.

### Contoh 1 – Kekuatan lentur (momen) menggunakan distribusi tegangan ekuivalen beton segi empat (bagian yang dikontrol tekan)

Contoh ini serupa dengan Contoh 6.1 dari *PCA Notes* pada ACI 318-08.

Untuk penampang balok yang disajikan, hitung kekuatan momen berdasarkan keseimbangan menggunakan distribusi tegangan ekuivalen beton segi empat seperti yang diperlihatkan pada Gambar 7.2 dari tata cara ini. Asumsi  $f_c' = 28$  MPa,  $f_{ju}^* = 550$  MPa, dan  $E_f = 41,000$  MPa. Asumsi kondisi paparan interior dan abaikan perkuatan tekan.



**Kalkulasi dan diskusi**

**Referensi**

Sifat batang diameter 25:

440.6-08, Tabel 7.1

$$d_b = 25,4 \text{ mm}$$

$$A_{f,bar} = 510 \text{ mm}^2$$

Sifat material desain:

$$C_E = 0,8$$

440.1R, Tabel 6.2

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* = (0,8)(550) = 440 \text{ MPa}$$

440.1R, Persamaan (6.2a)

1. Menentukan faktor reduksi kekuatan

$$d = 400 - 38 - 12,7 - (25,4/2) = 337 \text{ mm}$$

$$A_f = (3)(510 \text{ mm}^2) = 1530 \text{ mm}^2$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = \frac{1530}{(250)(337)} = 0,01816$$

440.1R, Persamaan (7.2.1a)

$$\rho_{fb} = 0,85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu} + f_{fu}}$$

440.1R, Persamaan (7.2.1b)

$$\rho_{fb} = 0,85(0,85) \frac{(28)}{(440)} \frac{(123)}{(123 + 440)} = 0,01004$$

$$\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} = \frac{0,01816}{0,01004} = 1,81$$

Karena  $\rho_f \geq 1,4\rho_{fb}$ , bagian tersebut telah terkontrol tekan  
 $\phi = 0,65$

440.1R, Persamaan (7.2.3)

**SNI 8970:2021**

2. Menentukan tegangan di dalam perkuatan tarik pada kondisi ultimit

$$f_f = \sqrt{\frac{(E_f \epsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85\beta_1 f_c'}{\rho_f} E_f \epsilon_{cu} - 0,5 E_f \epsilon_{cu}} \leq f_{fu} \quad 440.1R, \text{ Persamaan (7.2.3)}$$

$$f_f = \sqrt{\frac{(123)^2}{4} + \frac{0,85(0,85)(28)}{(0,01814)}(123) - 0,5(123)} \leq 440$$

$$f_f = 314 \text{ MPa}$$

3. Menentukan kekuatan lentur nominal  $M_n$  dan kekuatan lentur desain  $\phi M_n$

$$a = \frac{A_f f_f}{0,85 f_c' b} = \frac{(1530)(314)}{0,85(28)(250)} = 81 \text{ mm} \quad 440.1R, \text{ Persamaan (7.2.2b)}$$

$$M_n = A_f f_f \left( d - \frac{a}{2} \right) = (1530)(314) \left( 337 - \frac{81}{2} \right) = 142,4 \times 10^6 \text{ N-mm} = 142,4 \text{ kN-m} \quad 440.1R, \text{ Persamaan (7.2.2a)}$$

Cara lainnya, hitung  $M_n$  secara langsung

$$M_n = \rho_f f_f \left( 1 - 0,59 \frac{\rho_f f_f}{f_c'} \right) b d^2$$

$$= (0,01814)(314) \left( 1 - 0,59 \frac{(0,01814)(314)}{28} \right) (250)(337)^2 = 142,3 \times 10^6 \text{ N-mm} = 142,3 \text{ kN-m}$$

$$\phi M_n = (0,65)(142,3) = 92,5 \text{ kN-m} \quad 440.1R, \text{ Persamaan (7.2.2e)}$$

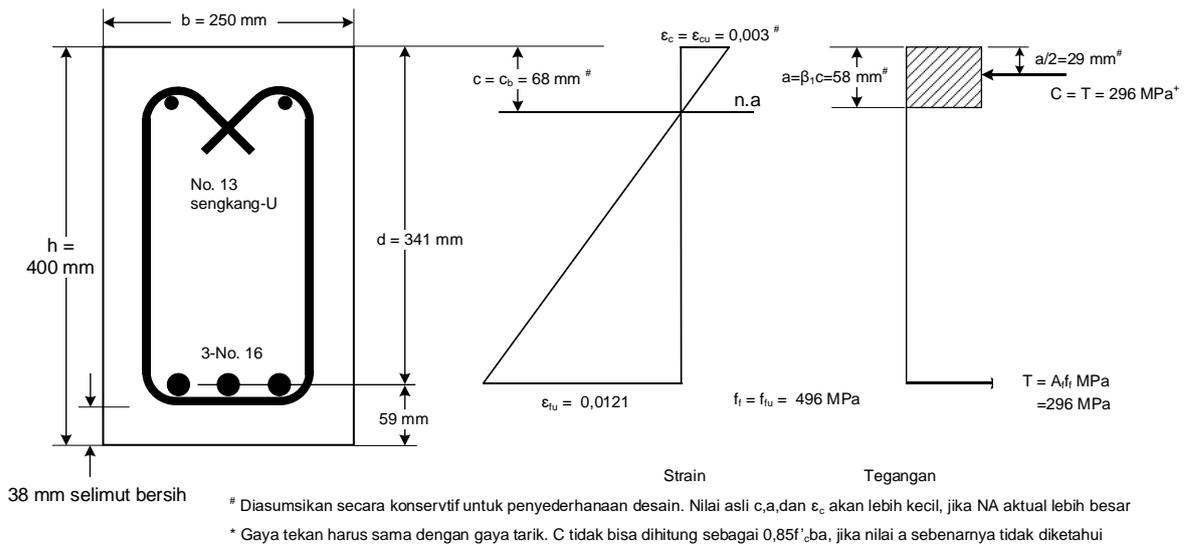
4. Penulangan minimum

Ketentuan penulangan minimum tidak diaplikasikan karena penampang ini tidak dikontrol tarik. 440.1R, Pasal (7.2.4)

**CATATAN** Saat prinsip dan prosedur standar yang digunakan dalam contoh ini dapat diaplikasikan untuk balok yang diperkuat FRP dengan berbagai bentuk penampang, persamaan khusus yang digunakan dalam contoh ini dilarang untuk penampang balok dengan perkuatan tunggal (atau penampang dengan tepian yang menggambarkan perilaku penampang segi empat) dengan perkuatan satu lapis.

**Contoh 2 – Kekuatan lentur (momen) menggunakan distribusi tegangan ekuivalen beton segi empat (penampang dengan kontrol tarik)**

Contoh ini serupa dengan Contoh 6.1 dari PCA *Notes* pada ACI 318-08. Untuk penampang balok yang disajikan, hitung kekuatan momen berdasarkan keseimbangan menggunakan distribusi tegangan ekuivalen beton segi empat seperti yang diperlihatkan pada Gambar 7.2 dari tata cara ini. Asumsi  $f_c' = 28 \text{ MPa}$ ,  $f_{fu}^* = 620 \text{ MPa}$ , dan  $E_f = 41.000 \text{ MPa}$ . Asumsi kondisi paparan interior dan abaikan perkuatan tekan.



**Kalkulasi dan diskusi**

**Referensi**

Sifat batang diameter 25:

440.6-08, Tabel 7.1

$d_b = 15.9 \text{ mm}$

$A_{f,bar} = 199 \text{ mm}^2$

Sifat material desain:

$C_E = 0,8$

440.1R, Tabel 6.2

$f_{tu} = C_{Eff} f_u^* = (0,8)(620) = 496 \text{ MPa}$

440.1R, Persamaan (6.2a)

1. Tentukan faktor reduksi kekuatan

$d = 400 - 38 - 12,7 - (15,9/2) = 341 \text{ mm}$

$A_f = (3)(199 \text{ mm}^2) = 597 \text{ mm}^2$

$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = \frac{597}{(250)(341)} = 0,00700$

440.1R, Persamaan (7.2.1a)

$\rho_{fb} = 0,85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{tu}} \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu} + f_{tu}}$

440.1R, Persamaan (7.2.1b)

$E_f \epsilon_{cu} = (41.000)(0,003) = 123 \text{ MPa}$

$\rho_{fb} = 0,85(0,85) \frac{(28)}{(496)} \frac{(123)}{(123 + 496)} = 0,00810$

$\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} = \frac{0,00700}{0,00810} = 0,86$

Karena  $\rho_f \leq \rho_{fb}$ , bagian ini telah terkontrol tariknya dan  $\phi = 0,55$  440.1R, Persamaan (7.2.3)

2. Tentukan tegangan di dalam batang tarik pada kondisi ultimit.

Karena penampang dikontrol tarik,  $f_f = f_{tu} = 496 \text{ MPa}$

## SNI 8970:2021

3. Tentukan kekuatan lentur nominal  $M_n$  dan kekuatan lentur desain  $\phi M_n$

$$c_b = \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) d = \left( \frac{0,003}{0,003 + \frac{496}{41.000}} \right) (341) = 68 \text{ mm} \quad 440.1R, \text{ Persamaan (7.2.2h)}$$

$$M_n = A_f f_{fu} \left( d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right) = (597)(496) \left( 341 - \frac{(0,85)(68)}{2} \right) = 92,4 \times 10^6 \text{ N-mm} = 92,4 \text{ kN-m}$$

$$\phi M_n = (0,55)(92,4) = 50,8 \text{ kN-m}$$

440.1R, Persamaan (7.2.2g)

4. Penulangan minimum

Ketentuan penulangan minimum diaplikasikan karena penampang dikontrol tarik.

440.1R, Pasal (7.2.4)

440.1R, Persamaan (7.2.4)

$$A_{f,min} = \frac{0,41\sqrt{28}}{496} (250)(341) \geq \frac{2,3}{496} (250)(341)$$

$$A_{f,min} = 395 \text{ mm}^2$$

$$A_f (\text{provided}) = 597 \text{ mm}^2 > A_{f,min} = 395 \text{ mm}^2 \text{ OK}$$

**CATATAN** Saat prinsip dan prosedur standar yang digunakan dalam contoh ini dapat diaplikasikan untuk balok yang diperkuat FRP dengan berbagai bentuk penampang, persamaan khusus yang digunakan dalam contoh ini dilarang untuk penampang balok dengan perkuatan tunggal (atau penampang dengan tepian yang menggambarkan perilaku penampang segi empat) dengan perkuatan satu lapis.

Prosedur yang digunakan dalam contoh ini, dideskripsikan pada 7.2.2, adalah perkiraan dan konservatif. Analisis yang lebih detail dari penampang dengan kontrol tarik membutuhkan perhitungan lokasi sumbu netral berdasarkan prinsip kompatibilitas regangan dan model konstitutif numerik untuk beton (sebagai contoh, parabolik dan Hognestad). Tipe analisis ini dapat intensif secara komputasi dan pada umumnya tidak dapat dihitung manual. Untuk masalah seperti yang disajikan pada contoh ini, perbedaan hasil (perhitungan kekuatan lentur) mungkin dapat diabaikan. Kompatibilitas analisis regangan disarankan untuk kasus-kasus dimana terdapat beberapa lapis batang atau ketika beberapa tipe FRP berbeda digabungkan (7.2.5.1).

### Contoh 3 – Desain balok segi empat hanya dengan perkuatan tarik

Contoh ini sama dengan Contoh 7.1 dari *PCA Notes* pada ACI 318-08.

Desain balok segi empat dengan lebar  $b = 300$  mm untuk memiliki kekuatan lentur yang memadai. Balok harus mampu menahan momen akibat beban layan  $M_D = 76$  kN-m dan  $M_L = 47$  kN-m. Asumsi kondisi paparan di dalam ruang.

$$f_c' = 28 \text{ MPa}$$

$$f_{fu}^* = 550 \text{ MPa}$$

$$E_f = 45.000 \text{ MPa}$$

**Kalkulasi dan diskusi****Referensi**

Sifat material desain:

$$C_E=0,8$$

440.1R, Tabel 6.2

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* = (0,8)(550) = 440 \text{ MPa}$$

440.1R, Persamaan (6.2a)

1. Titik awal yang umum pada desain elemen beton bertulang dengan dimensi yang tidak diketahui adalah dengan asumsi rasio batang.

Sebagai titik awal, asumsikan  $\rho_f = 1,5\rho_{fb}$ .

$$\rho_{fb} = 0,85\beta_1 \frac{f_c'}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}}$$

440.1R, Persamaan (7.2.1a)

$$E_f \varepsilon_{cu} = (45.000)(0.003) = 135 \text{ MPa}$$

$$\rho_{fb} = 0,85(0,85) \frac{(28)}{(440)} \frac{(135)}{(135 + 440)} = 0,01079$$

Karena  $\rho_f \geq 1,4\rho_{fb}$ , elemen ini dikontrol tekan.  
 $\phi = 0,65$

440.1R, Persamaan (7.2.3)

2. Hitung  $bd^2$  yang dibutuhkan

Pertama, tentukan kekuatan momen desain yang dibutuhkan

$$\phi M_{n,reqd} = M_u = 1,2M_D + 1,6M_L = 1,2(76) + 1,6(47) = 166,4 \text{ kN-m}$$

318-11, Persamaan(9-2)

Hitung tegangan pada penulangan tarik ( $f_f$ ) pada kondisi ultimit untuk nilai asumsi  $\rho_f$ .

$$f_f = \sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85\beta_1 f_c'}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu} - 0,5 E_f \varepsilon_{cu}} \leq f_{fu}$$

440.1R, Persamaan (7.2.2d)

$$f_f = \sqrt{\frac{(135)^2}{4} + \frac{0,85(0,85)(28)}{(0,01619)}(135) - 0,5(135)} \leq 440$$

$$f_f = 349 \text{ MPa}$$

Gunakan persamaan momen kapasitas untuk menentukan dimensi penampang yang dibutuhkan

$$M_u = \phi M_n = \phi \rho_f f_f \left( 1 - 0,59 \frac{\rho_f f_f}{f_c'} \right) b d^2$$

440.1R, Persamaan (7.2.2d)

$$(166,4)(10^6) = (0,65)(0,01619)(349) \left( 1 - 0,59 \frac{(0,01619)(349)}{(28)} \right) b d^2$$

$$b d^2 = 51,43 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

**SNI 8970:2021**

3. Ukuran elemen sehingga  $(bd^2)_{provided} \geq (bd^2)_{required}$

dengan  $b = 300$  mm, sehingga  $d = \sqrt{\frac{51,43 \times 10^6}{300}} = 414$  mm

4. Sekarang, tentukan penulangan yang dibutuhkan, tentukan diameter batang dan tentukan tinggi balok.

$$A_{f,perlu} = \rho_f b d = (0,01619)(300)(414) = 2011 \text{ mm}^2$$

Pilih empat batang diameter nomor 25 ( $A_f = 2040 \text{ mm}^2$ )

**CATATAN** pemeriksaan desain alternatif menggunakan ukuran batang lain mungkin membutuhkan perubahan nilai asumsi  $f_{ju}^*$  menjadi nilai yang sesuai untuk ukuran batang yang dipilih.

Batang diameter nomor 25:  $d_b=25,4$  mm 440.6-08, Tabel 7.1

Untuk paparan dalam ruang, selimut bersih adalah 38 mm 440.5-08, Tabel 3.1

Asumsi sengkang nomor 13:

$$h = (414) + (38) + (12,7) + \frac{(25,4)}{2} = 477 \text{ mm}$$

Bulatkan ke atas agar konservatif. Jadi, dipilih balok berukuran 300 x 500 mm.

5. Tentukan kapasitas penampang

$$d = 500 - \left[ (38) + (12,7) + \frac{(25,4)}{2} \right] = 437 \text{ mm}$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = \frac{2040}{(300)(437)} = 0,01556 \quad \text{440.1R, Persamaan (7.2.1a)}$$

$$\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} = \frac{0,01556}{0,01079} = 1,44$$

Karena  $\rho_f \geq 1,4 \rho_{fb}$ ,  $\phi = 0,65$ . 440.1R, Persamaan (7.2.3)

$$f_f = \sqrt{\frac{(E_f \epsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85 \beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \epsilon_{cu}} - 0,5 E_f \epsilon_{cu} \leq f_{ju} \quad \text{440.1R, Persamaan (7.2.3)}$$

$$f_f = \sqrt{\frac{(135)^2}{4} + \frac{0,85(0,85)(28)}{(0,01556)}(135)} - 0,5(135) \leq 440$$

$$f_f = 357 \text{ MPa}$$

$$M_n = \rho_f f_f \left( 1 - 0,59 \frac{\rho_f f_f}{f_c'} \right) b d^2$$

$$= (0,01556)(357) \left( 1 - 0,59 \frac{(0,01556)(357)}{28} \right) (300)(437)^2 = 281,0 \times 10^6 \text{ N-mm} = 281,0 \text{ kN-m}$$

440.1R, Persamaan (7.2.2e)

$$\phi M_n = (0,65)(281,0) = 182,3 \text{ kN-m} > M_u = 166,4 \text{ kN-m} \quad \text{OK}$$

**CATATAN** Banyak desain beton yang diperkuat FRP ditentukan oleh persyaratan layan yang berhubungan dengan kontrol retak, lendutan, dan keruntuhan rangkai, daripada persyaratan kekuatan lentur. Perhitungan yang berhubungan dengan persyaratan layan dibahas pada contoh lain pada Pasal ini.

#### Contoh 4 – Desain pelat satu arah

Contoh ini serupa dengan Contoh 7.2 dari *PCA Notes* pada ACI 318-08.

Tentukan ketebalan yang dibutuhkan dan perkuatan untuk pelat kontinu satu arah dengan tiga atau lebih bentang yang sama. Jarak as bentang  $\ell = 5,8 \text{ m}$  dan bentang bersih  $\ell_n = 5,5 \text{ m}$ . Asumsi kondisi paparan dalam ruang.

$$f_c' = 28 \text{ MPa}$$

$$f_{ju}^* = 650 \text{ MPa}$$

$$E_f = 41.000 \text{ MPa}$$

Beban layan:  $w_D =$  berat sendiri pelat (tidak ada beban mati tambahan),  $w_L = 24 \text{ kN/m}^2$

#### Perhitungan dan pembahasan

#### Referensi

Sifat material desain:

$$C_E = 0,8$$

440.1R, Tabel 6.2

$$f_{ju} = C_E f_{ju}^* = (0,8)(650) = 520 \text{ MPa}$$

440.1R, Persamaan (6.2a)

1. Tentukan kebutuhan tebal pelat

Berdasarkan tabel ketebalan minimum, pertimbangkan estimasi kedalaman. Ujung bentang akan mengatur ketebalan:

$$h = \frac{\ell}{17} = \frac{(5,8)(1000)}{17} = 341 \text{ mm}$$

440.1R, Tabel 7.3.2.1

2. Hitung momen desain menggunakan analisis perkiraan momen yang diizinkan oleh ACI318-11, Bagian 8.3.3. Desain akan mengacu pada ujung bentang karena akan menghasilkan momen terbesar

Asumsi akhir dari ujung bentang adalah bagian integral dari tumpuan.

**SNI 8970:2021**

300 mm berat batang  $[(300)/(1000)](24) = 7,2 \text{ kN/m}^2$

Beban terfaktor  $q_u = 1,2 (7,2) + 1,6 (2,4) = 12,5 \text{ kN/m}^2$  318-11, Persamaan (9-2)

Momen positif pada terputusnya integral akhir dari tumpuan:

$$+M_u = \frac{q_u \ell_n^2}{14} = \frac{(12,5)(5,5)^2}{14} = 27,0 \text{ kN-m/m}$$

318-11, Pasal 8.3.3

Momen negatif pada permukaan bagian luar dari tumpuan interior pertama:

$$-M_u = \frac{q_u \ell_n^2}{10} = \frac{(12,5)(5,5)^2}{10} = 37,8 \text{ kN-m/m}$$

318-11, Pasal 8.3.3

**3. Tentukan kebutuhan penulangan dan memilih batang.**

Asumsi penampang dikontrol tarik. Untuk kasus ini,  $f_f = f_{fu} = 520 \text{ MPa}$  dan  $\phi = 0,55$ .  
 Untuk paparan interior, selimut bersih sebesar 19 mm. 440.5-08, Tabel3.1

Asumsi batang nomor 16 untuk perkuatan lentur.  
 Diameter batang nomor 16:  $d_b = 15,9 \text{ mm}$  440.6-08, Tabel7.1

$$d = 300 - \left[ (19) + \frac{(15,9)}{2} \right] = 273 \text{ mm}$$

$$c_b = \left( \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fu}} \right) d = \left( \frac{0,003}{0,003 + \frac{520}{41.000}} \right) (273) = 52 \text{ mm}$$

440.1R, Persamaan (7.2.2h)

Gunakan persamaan tahanan momen untuk menyelesaikan luas penampang penulangan.  
 Dipakai  $-M$  karena menentukan.

$$M_u = \phi M_{n,reqd} = \phi A_{f,reqd} f_{fu} \left( d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right)$$

440.1R, Persamaan (7.2.2g)

$$A_{f,reqd} = \frac{M_u}{\phi f_{fu} \left( d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right)} = \frac{(37,8)(10^6)}{(0,55)(520) \left( 273 - \frac{(0,85)(52)}{2} \right)} = 527 \text{ mm}^2 / \text{m}$$

Perhatikan bahwa persyaratan ini jauh lebih kecil dari batang minimum, seperti yang dihitung berikut ini.

$$\rho_{f,ts} = 0,0014 \leq 0,0018 \times \frac{414 E_s}{f_{fu} E_f} \leq 0,0036$$

$$\rho_{f,ts} = 0,0014 \leq 0,0018 \times \frac{414 \cdot 200.000}{520 \cdot 41.000} \leq 0,0036$$

$$\rho_{f,ts} = 0,0014 \leq 0,0070 \leq 0,0036, \text{ sehingga } \rho_{f,ts} = 0,0036$$

$$A_{f,\min} = \rho_{f,\min} bh = (0,0036)(1000)(300) = 1010 \text{ mm}^2 / \text{m}$$

Pilih batang nomor 16 dengan spasi 180mm ( $A_f = 1106 \text{ mm}^2/\text{m}$ )

Verifikasi asumsi perilaku kontrol tarik:

$$\rho_{fb} = 0,85\beta_1 \frac{f_c'}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad 440.1R, \text{ Persamaan (7.2.1b)}$$

$$E_f \varepsilon_{cu} = (41.000)(0,003) = 123 \text{ MPa}$$

$$\rho_{fb} = 0,85(0,85) \frac{(28)}{(520)} \frac{(123)}{(123 + 520)} = 0,00744$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = \frac{1106}{(1000)(273)} = 0,00405 \quad 440.1R, \text{ Persamaan (7.2.1a)}$$

$$\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} = \frac{0,00405}{0,00744} = 0,54 \text{ OK}$$

Pelat dapat didesain dengan tebal 300 mm dengan batang nomor 16 dengan jarak 180mm untuk  $-M$ . Berdasarkan pengamatan, penulangan minimum yang sama akan dibutuhkan untuk  $+M$ .

Sebagai tambahan untuk kekuatan lentur, pelat harus diperiksa untuk geser dan kriteria layan dari kontrol retak, lendutan, dan batas tegangan keruntuhan rangkak. Kalkulasi yang berhubungan dengan persyaratan ini dicakup dalam contoh lain pada bab ini.

Perhitungan lebih lanjut menunjukkan bahwa pelat ini tidak akan retak saat layan dengan margin yang signifikan, dan bahkan tidak akan retak pada kondisi ultimit. Pelat akan bekerja namun akan sangat tidak efisien. Oleh sebab itu, pertimbangkan desain pelat yang lebih efisien yang dipilih untuk retak pada kondisi layan

#### 4. Desain ulang pelat yang retak pada beban layan.

Ketika retak, pelat beton yang diperkuat FRP jarang diatur oleh kekuatan lentur. Saat pelat dirancang untuk kekuatan lentur saja akan memiliki rasio momen tingkat layan dengan kekuatan momen nominal ( $M_{layan}/M_n$ ) sekitar 0,40 hingga 0,45, tergantung pada rasio beban mati sampai beban hidup, sebagian besar pelat yang diperkuat FRP adalah diatur oleh persyaratan kemudahan layan dan akan menunjukkan rasio yang lebih dekat ke 0,20 hingga 0,25. Sebagai perkiraan desain, desain untuk kekuatan lentur sesuai dengan kira-kira dua kali dengan momen terfaktor aktual ( $2,0M_u$ ).

Pilih rasio perkuatan sesuai dengan bagian yang dikontrol tekan, karena hal ini akan membuat penggunaan penguatan yang cukup untuk mengontrol retak dan mengurangi lendutan.

Desain  $2,0M_u$  dan sebagai titik awal, asumsikan  $\rho_f = 1,5\rho_{fb}$ .

$$\rho_f = 1,5\rho_{fb} = 1,5(0,00744) = 0,01116$$

Hitung tegangan pada perkuatan tarik ( $f_f$ ) pada kondisi ultimit untuk nilai  $\rho_f$  yang diasumsikan.

**SNI 8970:2021**

$$f_f = \sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85\beta_1 f_c'}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu} - 0,5 E_f \varepsilon_{cu}} \leq f_{fu} \quad 440.1R, \text{ Persamaan (7.2.2d)}$$

$$f_f = \sqrt{\frac{(123)^2}{4} + \frac{0,85(0,85)(28)}{(0,01116)}(123) - 0,5(123)} \leq 520$$

$$f_f = 415 \text{ MPa}$$

Estimasi beban mati berdasarkan asumsi tebal pelat 200 mm:

$$200 \text{ mm berat pelat } [(200)/(1000)](24) = 4,8 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Beban terfaktor } q_u = 1,2(4,8) + 1,6(2,4) = 9,6 \text{ kN/m}^2 \quad 318-11, \text{ Persamaan (9-2)}$$

Momen negatif pada permukaan eksterior dari tumpuan interior pertama (yang mengatur):

$$-M_u = \frac{q_u \ell_n^2}{10} = \frac{(9,6)(5,5)^2}{10} = 29,0 \text{ kN-m/m} \quad 318-11, \text{ Pasal 8.3.3}$$

Gunakan persamaan kapasitas momen untuk menentukan tebal pelat.

$$M_u = \phi M_n = \phi \rho_f f_f \left( 1 - 0,59 \frac{\rho_f f_f}{f_c'} \right) b d^2 \quad 440.1R, \text{ Persamaan (7.2.2e)}$$

$$2(29,0)(10^6) = (0,65)(0,01116)(415) \left( 1 - 0,59 \frac{(0,01116)(415)}{(28)} \right) (1000)d^2$$

$$d = 146 \text{ mm}$$

Asumsi batang nomor 19 digunakan untuk perkuatan lentur.

$$h = (146) + (19) + \frac{(19,1)}{2} = 175 \text{ mm}$$

Pembulatan ke atas agar konservatif (180 mm tebal pelat [ $h = 180 \text{ mm}$ ]).

Koreksi beban mati untuk ketebalan 180 mm:

$$180 \text{ mm berat pelat } [(180)/(1000)](24) = 4,3 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Beban terfaktor } q_u = 1,2(4,3) + 1,6(2,4) = 9,0 \text{ kN/m}^2 \quad 318-11, \text{ Persamaan(9-2)}$$

Kapasitas lentur harus diperiksa, namun harus memenuhi inspeksi karena desain yang dilakukan berdasarkan kapasitas yang disediakan  $2,0M_u$ . Jadi, perhitungan kapasitas tidak dibutuhkan.

Pilih perkuatan untuk pelat.

Asumsi perkuatan yang sama untuk  $-M$  dan  $+M$ .

$$A_f = \rho_{fbd} = (0,01116)(1000)(146) = 1629 \text{ mm}^2/\text{m} \quad 440.1\text{R, Persamaan (7.2.1a)}$$

Pilih batang nomor 19 dengan spasi 150 mm ( $A_f = 1890 \text{ mm}^2/\text{m}$ ).

5. Tentukan penulangan susut dan suhu untuk arah melintang.

$$\rho_{f,ts} = 0,0014 \leq 0,0018 \times \frac{414}{f_{fu}} \frac{E_s}{E_f} \leq 0,0036 \quad 440.1\text{R, Persamaan (9.1)}$$

$$\rho_{f,ts} = 0,0014 \leq 0,0018 \times \frac{414}{520} \frac{200,000}{41,000} \leq 0,0036$$

$$\rho_{f,ts} = 0,0014 \leq 0,0070 \leq 0,0036, \text{ so } \rho_{f,ts} = 0,0036$$

$$A_{f,ts} = \rho_{f,ts} bh = (0,0036)(1000)(180) = 648 \text{ mm}^2 / \text{m}$$

Pilih batang nomor 13 dengan spasi 180 mm ( $A_f = 717 \text{ mm}^2/\text{m}$ ).

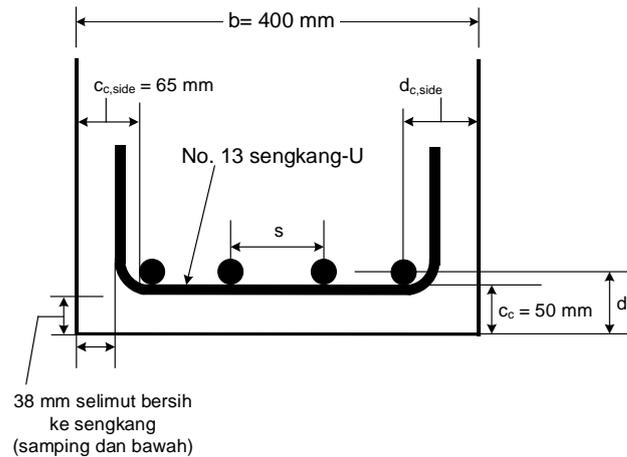
**CATATAN** Perhitungan yang berhubungan dengan persyaratan ini dicakup dalam contoh lain pada Pasal ini. Jika kriteria desain tidak dipenuhi, maka tebal pelat dapat meningkat secara bertahap atau perlu penambahan batang.

### Contoh 5— Distribusi penulangan untuk kontrol retak efektif

Contoh ini serupa dengan Contoh 9.1 dari *PCA Notes* pada ACI 318-08.

Balok segi empat didesain untuk momen terfaktor  $M_u = 177 \text{ kN-m}$ . Balok memiliki lebar 400 mm dan tinggi 600 mm, dan kebutuhan luas penampang penulangan lentur GFRP telah dihitung senilai  $A_{f,reqd} = 1460 \text{ mm}^2$ . Tentukan pengaturan penulangan lentur yang memenuhi persyaratan kontrol retak pada 7.3.1. Asumsi jarak bersih selimut bawah ke penulangan lentur (cc) 50 mm (perkiraan 38 mm selimut bersih + 13 mm diameter sengkang). Asumsi jarak bersih selimut samping ke penulangan lentur ( $c_{c,side}$ ) 65mm (perkiraan 38 mm selimut bersih + 13 mm diameter sengkang + 13 mm untuk mengakomodasi jari-jari dalam bengkokan). Momen beban layan tidak terfaktor  $M_s = 122 \text{ kN-m}$ . Asumsi kondisi paparan dalam ruang.

$$\begin{aligned} f_c' &= 28 \text{ MPa} \\ f_{fu}^* &= 550 \text{ MPa} \\ E_f &= 40.000 \text{ MPa} \end{aligned}$$



**Perhitungan dan pembahasan**

**Referensi**

Sifat material desain:

$C_E = 0,8$

440.1R, Tabel 6.2

$f_{ju} = C_E f_{ju}^* = (0,8)(550) = 440 \text{ MPa}$

440.1R, Persamaan (6.2a)

1. Tentukan perkuatan

Empat batang diameter nomor 22 ( $A_f = 1550 \text{ mm}^2$ )

Batang diameter nomor 22:  $d_b = 22,2 \text{ mm}$

440.6-08, Tabel 7.1

2. Periksa batas nilai  $d_c$ :

$$d_c \leq \frac{E_f w}{2 f_{fs} \beta k_b}$$

440.1R, Persamaan (7.3.1b)

Asumsi lebar retak maksimum yang diizinkan 0,70mm.

440.1R, Pasal 7.3.1

Ambil  $k_b = 1,4$ .

440.1R, Sec.7.3.1

Parameter  $\beta$  dan  $f_{fs}$  harus ditentukan dari analisis retak bagian linear-elastis pada beban layan. Banyak perhitungan ini yang dicakup pada 7.3.2.2 dan 7.4.1.

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f$$

440.1R, Pasal (7.3.2b)

$$d_c = c_c + \frac{d_b}{2} = 50 + \frac{22,2}{2} = 61 \text{ mm}$$

$$d = h - d_c = 600 - 61 = 539 \text{ mm}$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = \frac{1550}{(400)(539)} = 0,00719$$

440.1R, Persamaan (7.2.1a)

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} = 4700\sqrt{28} = 24.900 \text{ MPa}$$

318-11, Pasal 8.5.1

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{41.000}{24.900} = 1,647$$

$$\rho_f n_f = (0,00719)(1,647) = 0,01184$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f = \sqrt{2(0,01184) + (0,01184)^2} - 0,01184 = 0,412$$

$$\begin{aligned} I_{cr} &= \frac{bd^3}{3} k^3 + n_f A_f d^2 (1-k)^2 \\ &= \frac{(400)(539)^3}{3} (0,412)^3 + (1,647)(1550)(539)^2 (1-0,412)^2 = 605,7 \times 10^6 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

440.1R, Persamaan (7.3.2.2a)

Tingkat tegangan layan pada perkuatan FRP (mengacu pada Persamaan (7.4.1.) untuk perhitungan yang sama berdasarkan beban layan tetap)

$$f_{fs} = M_s \frac{n_f d (1-k)}{I_{cr}} = \left( (122)(10^6) \right) \frac{(1,647)(539)(1-0,412)}{605,7 \times 10^6} = 153 \text{ MPa}$$

440.1R, Persamaan (7.4.1)

$$\beta = \frac{h - kd}{d - kd} = \frac{600 - (0,412)(539)}{539 - (0,412)(539)} = 1,13$$

Setelah parameter dihitung, periksa batas  $d_c$

$$\begin{aligned} d_c &\leq \frac{E_f w}{2 f_{fs} \beta k_b} \\ 61 \text{ mm} &\leq \frac{(41.000)(0,70)}{2(153)(1,13)(1,4)} \end{aligned}$$

440.1R, Persamaan (7.3.1b)

61 mm > 59 mm , diabaikan

Meskipun batas  $d_c$  tidak dipenuhi, lanjutkan pemeriksaan jarak spasi batang untuk tujuan ilustrasi seperti berikut

Periksa jarak batang terhadap jarak batang maksimum:

$$\begin{aligned} s_{max} &= 1,15 \frac{E_f w}{f_{fs} k_b} - 2,5 c_c \leq 0,92 \frac{E_f w}{f_{fs} k_b} \\ s_{max} &= 1,15 \frac{(41.000)(0,070)}{(153)(1,4)} - 2,5(50) \leq 0,92 \frac{(41.000)(0,070)}{(153)(1,4)} \end{aligned}$$

440.1R, Persamaan (7.3.1a)

$$s_{max} = 29 \leq 123, \text{ sehingga } s_{max} = 29 \text{ mm}$$

Sediakan jarak antar as batang:

**SNI 8970:2021**

$$s_{provided} = \frac{b - sd_{c,side}}{N - 1}$$

$d_{c,side}$  = selimut samping ke as batang eksterior = 65 + (1/2)(22,2) = 76 mm

$N$  = jumlah batang = 4

$$s_{provided} = \frac{400 - 2(76)}{4 - 1}$$

$s_{provided} = 83 \text{ mm} > s_{max} = 29 \text{ mm}$  NG

Batang yang dipilih ini tidak memenuhi persyaratan kontrol retak berdasarkan perhitungan di atas. Kedua jarak batas selimut ( $d_c$ ) dan spasi ( $s$ ) tidak dipenuhi.

Catat bahwa persyaratan jarak bersih batang minimum juga harus dipenuhi. Dalam kasus ini, jarak maksimum as ke as batang 27,7 mm sesuai persamaan (7.3.1a) terlalu kecil sehingga jarak spasi bersih ( $d_b$ , 25mm, atau 4/3 dari ukuran agregat maksimum) sesuai ACI318-11, Bagian.7.6, tidak mungkin disediakan (318-11, Pasal 7.6).

3. Pilih batang baru. Secara umum, pemeriksaan yang disebutkan tidak dipenuhi, maka perkuatan tambahan akan diperlukan sedemikian rupa sehingga tegangan batang FRP saat layan berkurang. Tingkatkan jumlah batang dan coba dua kemungkinan yang berbeda:

Tiga batang nomor 25 ( $A_f = 1940 \text{ mm}^2$ ;  $d_b = 28,7 \text{ mm}$ ) 440.6-08, Tabel 7.1

Lima batang nomor 22 ( $A_f = 1940 \text{ mm}^2$ ;  $d_b = 22,2 \text{ mm}$ ) 440.6-08, Tabel 7.1

Perhitungan diulang untuk dua kemungkinan ini sama seperti pemeriksaan pilihan sebelumnya. Nilai ditampilkan dalam format tabel untuk menghemat tempat dan memfasilitasi perbedaan.

Parameter	Unit	Empat No. 22	Tiga No. 29	Lima No. 22
$A_f$	mm <sup>2</sup>	1550	1940	1940
$d$	mm	539	536	539
$d_c$	mm	61	64	61
$\rho_f$		0,00719	0,00905	0,009000
$k$		0,142	0,158	0,158
$I_{cr}$	mm <sup>4</sup>	605,7 x 10 <sup>6</sup>	731,8 x 10 <sup>6</sup>	740,5 x 10 <sup>6</sup>
$f_{fs}$	MPa	153	124	123
$\beta$		1,13	1,14	1,13
$d_c$ (batas nilai)	mm	59	73	74
Cek jika $d_c \leq d_c$ (batas nilai)		<b>diabaikan</b>	<b>OK</b>	<b>OK</b>
$s_{max}$ (batas nilai)	mm	29	65	67
$d_{c,side}$	mm	76	79	76
$s_{provides}$	mm	83	121	62
Cek jika $s_{provided} \leq s_{max}$		<b>diabaikan</b>	<b>diabaikan</b>	<b>OK</b>

Seperti terlihat pada tabel, pilihan tiga batang No. 29 memberikan tambahan penulangan yang cukup untuk mengurangi tegangan pada batang. Namun, batang memiliki spasi yang terlalu jauh untuk memenuhi persyaratan spasi maksimum, tetapi jarak penulangan terlalu lebar tidak

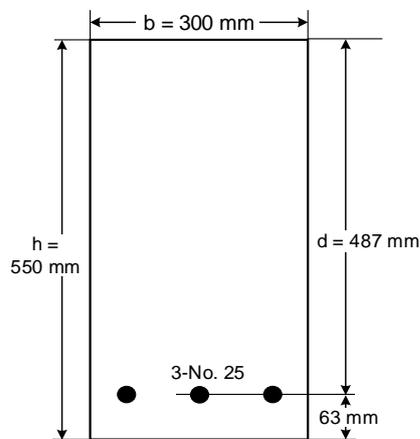
memenuhi jarak spasi maksimum, karena batang tidak cukup terdistribusi merata untuk mengontrol lebar retak.

Pilihan lima batang nomor 22 memberikan jumlah perkuatan yang sama dengan pilihan tiga batang nomor 29, namun distribusi batang lebih baik terhadap lebar penampang. Lima batang akan ditempatkan cukup rapat untuk mengatur retak dan cukup jauh untuk menyediakan spasi bersih yang dibutuhkan ACI 318-11, Bagian.7.6.

Gunakan lima batang nomor 22 yang didistribusi satu lapis.

### Contoh 6— Lendutan balok sederhana persegi panjang nonprategang

Contoh ini serupa dengan Contoh 10.1 dari *PCA Notes on ACI 318-08*.



Persyaratan: analisis lendutan dan perbandingan terhadap lendutan izin ACI 318-11. Pertimbangkan lendutan jangka panjang pada 3 bulan dan 5 tahun (nilai ultimit).

Data:

$$f'_c = 21 \text{ MPa (beton normal)}$$

$$E_f = 45.000 \text{ MPa}$$

Beban mati tambahan (tidak termasuk berat balok) = 1,8 kN/m Beban hidup = 4,4 kN/m (20 persen berkelanjutan)

Bentang = 7,5 m (tumpuan sederhana)

### Perhitungan dan pembahasan

### Referensi

Sifat tulangan D25:

440.6-08, Tabel 7.1

$$d_b = 25,4 \text{ mm}$$

$$A_{f,bar} = 510 \text{ mm}^2$$

Jumlah tulangan yang dibutuhkan untuk perhitungan:

$$A_f = (3)(510 \text{ mm}^2) = 1530 \text{ mm}^2$$

**SNI 8970:2021**

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = \frac{1530}{(300)(487)} = 0,01047 \quad 440.1R, \text{ Persamaan (7.2.1a)}$$

1. Periksa rekomendasi tebal balok minimum.

Berdasarkan tabel tebal minimum, pertimbangkan estimasi tinggi:

$$h \approx \frac{\ell}{10} = \frac{(7,5)(1000)}{10} = 750 \text{ mm} \quad 440.1R, \text{ Persamaan (7.3.2.1)}$$

Tabel 7.3.2.1 ditujukan untuk menyediakan tata cara untuk desain awal, dan tidak memastikan bahwa batas lendutan terpenuhi, sehingga lendutan akan dihitung.

2. Momen

$$w_D = 1,8 + \frac{(300)(550)(24)}{1000} = 5,8 \text{ kN/m}$$

$$M_D = \frac{w_D \ell^2}{8} = \frac{(5,8)(7,5)^2}{8} = 40,8 \text{ kN-m}$$

$$M_L = \frac{w_L \ell^2}{8} = \frac{(4,4)(7,5)^2}{8} = 30,9 \text{ kN-m}$$

$$M_{sus} = M_D + 0,20(M_L) = 40,8 + (0,20)(30,9) = 47,0 \text{ kN-m}$$

$$M_{D+L} = 40,8 + 30,9 = 71,7 \text{ kN-m}$$

3. Modulus elastisitas dan rasio modular:

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} = 4700\sqrt{21} = 21.500 \text{ MPa} \quad 318-11, \text{ Bagian. (8.5.1)}$$

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{45.000}{21.500} = 2,093$$

4. Momen inersia kotor dan bagian retak:

$$I_g = \frac{bh^3}{12} = \frac{(300)(550)^3}{12} = 4,159 \times 10^9 \text{ mm}^4$$

$$\rho_f n_f = (0,01047)(2,093) = 0,02191$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f = \sqrt{2(0,02191) + (0,02191)^2} - 0,02191 = 0,189 \quad 440.1R, \text{ Persamaan (7.3.2.2b)}$$

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3} k^3 + n_f A_f d^2 (1-k)^2$$

$$= \frac{(300)(487)^3}{3} (0,189)^3 + (2,093)(1530)(487)^2 (1-0,189)^2 = 0,578 \times 10^9 \text{ mm}^4$$

440.1R, Persamaan (7.3.2.2a)

$$\frac{I_g}{I_{cr}} = \frac{4,159 \times 10^9}{0,578 \times 10^9} = 7,20 \quad \frac{I_{cr}}{I_g} = \frac{0,578 \times 10^9}{4,159 \times 10^9} = 0,139$$

5. Momen inersia efektif:

$$M_{cr} = \frac{0,62\lambda\sqrt{f_c'}I_g}{y_t} = \frac{0,62(1)(\sqrt{21})(4,159 \times 10^9)}{(1/2)(550)(10^6)} = 43,0 \text{ kN-m} \quad 440.1R, \text{ Persamaan (7.3.2.2d)}$$

Asumsi elemen dibebani hingga beban mati penuh sebelum beban hidup apapun diaplikasikan, momen inersia efektif dapat dihitung berdasarkan beban mati sendiri. (Asumsi ini akan menghasilkan estimasi konservatif dari lendutan beban hidup pada tahap berikutnya). Karena  $M_D < M_{cr}$ , balok ini tidak retak pada kondisi ini. Jadi momen inersia untuk beban mati adalah  $I_g$ .

$$(I_e)_D = I_g = 4,159 \times 10^9 \text{ mm}^4$$

Cari momen inersia efektif akibat beban hidup dan beban mati.

$$\frac{M_{cr}}{M_a} = \frac{M_{cr}}{M_{D+L}} = \frac{43,0}{71,7} = 0,600$$

$$\gamma = 1,72 - 0,72 (M_{cr}/M_a) = 1,72 (0,600) = 1,288$$

440.1R, Bagian. 7.3.2.2

$$\begin{aligned} (I_e)_{D+L} &= \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2 \left[ 1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \right]} \\ &= \frac{0,578 \times 10^9}{1 - (1,288)(0,600)^2 [1 - 0,139]} = 0,962 \times 10^9 \text{ mm}^4 \end{aligned} \quad 440.1R, \text{ Persamaan (7.3.2.2c)}$$

6. Lendutan seketika

$K = 1$  for simple spans

$$(\Delta_i)_D = \frac{K(5)M_D\ell^2}{48E_c(I_e)_D} = \frac{(1)(5)(40,8)(7,5)^2(10^{12})}{48(21.500)(4,159 \times 10^9)} = 2,7 \text{ mm}$$

$$(\Delta_i)_{D+L} = \frac{K(5)M_{D+L}\ell^2}{48E_c(I_e)_{D+L}} = \frac{(1)(5)(71,7)(7,5)^2(10^{12})}{48(21.500)(0,962 \times 10^9)} = 20,3 \text{ mm}$$

Lendutan beban hidup seketika didapat dengan mengurangi lendutan beban mati dari lendutan akibat total beban hidup dan beban mati.

$$(\Delta_i)_L = (\Delta_i)_{D+L} - (\Delta_i)_D = 20,3 - 2,7 = 17,6 \text{ mm}$$

Hal ini konservatif untuk menemukan lendutan seketika akibat beban tetap dengan menggunakan momen inersia efektif berdasarkan total beban hidup dan mati.

$$(\Delta_i)_{sus} = \frac{K(5)M_{sus}\ell^2}{48E_c(I_e)_{D+L}} = \frac{(1)(5)(47,0)(7,5)^2(10^{12})}{48(21.500)(0,962 \times 10^9)} = 13,3 \text{ mm}$$

**SNI 8970:2021**

$$(\Delta_i)_{L,unsustained} = (\Delta_i)_{D+L} - (\Delta_i)_{sus} = 20,3 - 13,3 = 7,0 \text{ mm}$$

7. Bagian tambahan dari lendutan total yang terjadi setelah penempatan komponen nonstruktural (total lendutan jangka panjang akibat beban tetap dan lendutan seketika akibat beban hidup tambahan apapun)

a. 3 bulan ( $\xi = 1,0$ ) 318-11, Bagian.9.5.2.5

$$\Delta_{incr} = \Delta_{LT,sus} + \Delta_{L,unsustained} = 0,6\xi(\Delta_i)_{sus} + (\Delta_i)_{L,unsustained} = 0,6(1,0)(13,3) + 7,0 = 15,0 \text{ mm}$$

440.1R, Persamaan (7.3.2.3c)

b. 5 tahun ( $\xi = 2,0$ ) 318-11, Bagian.9.5.2.5

$$\Delta_{incr} = \Delta_{LT,sus} + \Delta_{L,unsustained} = 0,6\xi(\Delta_i)_{sus} + (\Delta_i)_{L,unsustained} = 0,6(2,0)(13,3) + 7,0 = 23,0 \text{ mm}$$

440.1R, Persamaan (7.3.2.3c)

8. Bandingkan perhitungan lendutan untuk lendutan izin.

Lendutan izin (beban hidup seketika): 318-11, Tabel 9.5(b)

Atap datar tidak mendukung dan tidak melekat pada elemen nonstruktural mungkin dapat rusak akibat lendutan besar:

$$\{(\Delta_i)_L = 17,6 \text{ mm}\} \leq \left\{ \frac{\ell}{180} = \frac{(7,5)(1000)}{180} = 41,7 \text{ mm} \right\} \text{ OK}$$

Lantai tidak mendukung dan tidak terikat pada elemen nonstruktural mungkin dapat rusak akibat lendutan besar:

$$\{(\Delta_i)_L = 17,6 \text{ mm}\} \leq \left\{ \frac{\ell}{360} = \frac{(7,5)(1000)}{360} = 20,8 \text{ mm} \right\} \text{ OK}$$

Lendutan izin (tambahan akibat penempatan elemen nonstruktural): ACI 318-11, Tabel 9.5(b)

Pelaksanaan atap atau lantai mendukung atau terikat pada elemen nonstruktural memiliki kemungkinan kecil untuk rusak akibat lendutan besar:

$$\{\Delta_{incr} = 23,0 \text{ mm}\} \leq \left\{ \frac{\ell}{240} = \frac{(7,5)(1000)}{240} = 31,3 \text{ mm} \right\} \text{ OK}$$

Pelaksanaan atap atau lantai mendukung atau terikat pada elemen nonstruktural memiliki kemungkinan kecil untuk rusak akibat lendutan besar (kriteria yang sangat ketat):

$$\{\Delta_{incr} = 23,0 \text{ mm}\} \leq \left\{ \frac{\ell}{480} = \frac{(7,5)(1000)}{480} = 15,6 \text{ mm} \right\} \text{ NG}$$

Jika elemen nonstruktural mungkin rusak akibat lendutan besar ditumpu oleh elemen ini, perlu ada desain ulang untuk mendapat kekakuan lentur yang lebih besar. Jika sebaliknya, elemen memadai.

### Contoh 7— Pemeriksaan tegangan keruntuhan rangkak akibat beban tetap

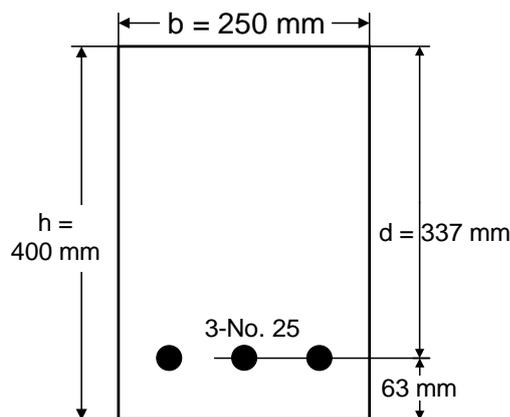
Contoh ini tidak memiliki pasangan dalam PCA Notes on ACI 318-08 karena keruntuhan rangkak adalah fenomena FRP.

Balok segi empat seperti yang diperlihatkan didesain untuk menopang momen beban  $M_D = 24$  kN-m dan  $M_L = 24$  kN-m. Asumsi 20 persen beban hidup tetap. Verifikasi bahwa balok memenuhi batas tegangan keruntuhan rangkak pada 7.4.1. Asumsi kondisi paparan interior.

$$f_c' = 28 \text{ MPa}$$

$$f_{ju}^* = 550 \text{ MPa}$$

$$E_f = 41.000 \text{ MPa}$$



### Perhitungan dan pembahasan

Sifat tulangan D 25:

$$d_b = 25,4 \text{ mm}$$

$$A_{f,bar} = 510 \text{ mm}^2$$

Jumlah tulangan yang dibutuhkan untuk kalkulasi:

$$A_f = (3)(510 \text{ mm}^2) = 1530 \text{ mm}^2$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = \frac{1530}{(250)(337)} = 0,01816$$

440.1R, Persamaan (7.2.1a)

Sifat material desain:

$$C_E = 0,8$$

440.1R, Tabel 6.2

**SNI 8970:2021**

$$f_{ju} = C_E f_{ju}^* = (0,8)(550) = 440 \text{ MPa} \quad 440.1R, \text{ Persamaan (6.2a)}$$

1. Beban momen tetap:

$$M_{sus} = M_D + 0,20(M_L) = 24 + (0,20)(24) = 28 \text{ kN-m}$$

2. Modulus elastisitas dan rasio modular:

$$E_c = 4700\sqrt{f_c'} = 4700\sqrt{28} = 24.900 \text{ MPa} \quad 318-11, \text{ Bagian. 8.5.1}$$

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{41.000}{24.900} = 1,647$$

3. Momen inersia penampang yang retak

$$\rho_f n_f = (0,01816)(1,647) = 0,02991$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f = \sqrt{2(0,02991) + (0,02991)^2} - 0,02991 = 0,216 \quad 440.1R, \text{ Persamaan (7.3.2.2b)}$$

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3} k^3 + n_f A_f d^2 (1-k)^2$$

$$= \frac{(250)(337)^3}{3} (0,216)^3 + (1,647)(1530)(337)^2 (1-0,216)^2 = 0,208 \times 10^9 \text{ mm}^4 \quad 440.1R, \text{ Persamaan (7.3.2.2a)}$$

4. Tulangan tegangan dengan beban layan tetap:

$$f_{fs,sus} = M_{s,sus} \frac{n_f d (1-k)}{I_{cr}} \quad 440.1R, \text{ Persamaan (7.4.1)}$$

$$f_{fs,sus} = (28,8)(10^6) \frac{(1,647)(337)(1-0,216)}{0,208 \times 10^9} = 60 \text{ MPa}$$

Tegangan tulangan izin: 440.1R, Tabel 7.4.1

$$\{f_{fs,sus} = 60 \text{ MPa}\} \leq \{0,20f_{ju} = 0,20(440) = 88 \text{ MPa}\} \text{ OK}$$

**Contoh 8—Desain geser (komponen lentur dan geser)**

Contoh ini serupa dengan Contoh 12.1 dari PCA *Notes on ACI 318-08*.

Tentukan ukuran yang diperlukan dan spasi sengkang U-vertikal untuk bentang 5,5 m, balok beton bertulang tumpuan sederhana dengan berat normal. Asumsi kondisi paparan interior.

$$b_w = 300 \text{ mm}$$

$$d = 500 \text{ mm}$$

$$f_c' = 28 \text{ MPa}$$

$$f_{iu}^* = 700 \text{ MPa (sengkang)}$$

$$E_f = 41000 \text{ MPa (sengkang)}$$

$$w_u = 70,8 \text{ kN/m (termasuk berat sendiri)}$$

$$\rho_f = 0,0272 \text{ (tulangan longitudinal)}$$

$$r_b/d_b = 4 \text{ (asumsi lengkung batang sengkang yang bengkok)}$$

**Perhitungan dan pembahasan****Referensi**

Sifat desain material:

$$C_E = 0,8$$

$$f_{iu} = C_E f_{iu}^* = (0,8)(700) = 560 \text{ MPa}$$

440.1R, Tabel 6.2

440.1R, Persamaan (6.2a)

Untuk tujuan dari contoh ini, beban hidup akan diasumsikan ada pada bentang penuh sehingga desain geser pada tengah bentang sebesar nol. (Sebuah desain geser yang lebih besar dari nol pada tengah bentang didapat dengan mempertimbangkan sebagian pembebanan hidup dari bentang.)

1. Tentukan gaya geser terfaktor.

Pada tumpuan:

$$V_u = 70,8 \left( \frac{5,5}{2} \right) = 194,7 \text{ kN}$$

Pada jarak  $d$  dari tumpuan:

$$V_u = 194,7 - 70,8 \left( \frac{500}{1000} \right) = 159,3 \text{ kN}$$

2. Tentukan tahanan geser yang diberikan beton.

$$\phi V_c = \phi \left( \frac{5}{2} k \right) 2 \sqrt{f_c'} b_w d$$

440.1R, Persamaan (8.2b)

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c'} = 4700 \sqrt{28} = 24.900 \text{ MPa}$$

318-11, Bagian. 8.5.1

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{41.000}{24.900} = 1,647$$

$$\rho n_f = (0,0272)(1,647) = 0,04480$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f = \sqrt{2(0,04480) + (0,04480)^2} - 0,04480 = 0,258$$

440.1R, Persamaan (7.3.2.2b)

**SNI 8970:2021**

$$\phi V_c = (0,75) \left( \frac{0,258}{5} \right) 2\sqrt{28} (300)(500) \left( \frac{1}{1000} \right) = 61,4 \text{ kN}$$

$$V_u = 159,3 \text{ kN} > \phi V_c / 2 = 31,2 \text{ kN}$$

Oleh sebab itu, tulangan geser diperlukan.

440.1R, Bagian.8.2.2

3. Hitung  $V_u - \phi V_c$  pada bagian kritis.

$$V_u - \phi V_c = 159,3 - 61,4 = 97,9 \text{ kN} < \phi 0,66 \sqrt{f_c'} b_w d = 393 \text{ kN} \quad \text{OK} \quad 440.1R, \text{ Bagian. 8.2.3}$$

4. Tentukan jarak  $x_c$  dari tumpuan di luar daerah dimana tulangan geser tidak dibutuhkan untuk kekuatan ( $V_u = \phi V_c$ ):

$$x_c = \frac{V_u @ \text{support} - \phi V_c}{w_u} = \frac{194,7 - 61,4}{70,8} = 1,88 \text{ m}$$

Tentukan jarak  $x_m$  dari tumpuan di luar daerah dimana tulangan geser tidak dibutuhkan ( $V_u = \phi V_c / 2$ ):

$$x_m = \frac{V_u @ \text{support} - (\phi V_c / 2)}{w_u} = \frac{194,7 - (61,4/2)}{70,8} = 2,32 \text{ m}$$

Oleh sebab itu, hanya tulangan geser minimum yang dibutuhkan di antara 1,88 m dan 2,32 m dari tumpuan. Tulangan geser tidak dibutuhkan setelah melewati 2,32 m dari tumpuan.

5. Tentukan desain tegangan tarik pada tulangan geser.

Kekuatan tarik pada batang tertekuk:

$$f_{fb} = \left( 0,05 \cdot \frac{r_b}{d_b} + 0,3 \right) f_{fu} \leq f_{fu} \quad 440.1R, \text{ Persamaan (6.2.1)}$$

$$f_{fb} = (0,05 \cdot 4 + 0,3) f_{fu} \leq f_{fu}$$

$$f_{fb} = (0,50) f_{fu} \leq f_{fu}$$

$$f_{fb} = (0,50)(560) = 280 \text{ MPa}$$

Desain kekuatan tarik berdasarkan regangan sebesar 0,004:

$$f_{fv} = 0,004 E_f \leq f_{fb} \quad 440.1R, \text{ Persamaan (8.2d)}$$

$$f_{fv} = 0,004(41,000) \leq 280$$

$$f_{fv} = 164 \leq 280$$

$$f_{fv} = 164 \text{ MPa}$$

6. Tentukan kebutuhan spasi sengkang U vertikal pada bagian kritis.

$$\frac{A_{fv}}{s} = \frac{(V_u - \phi V_c)}{\phi f_{fv} d} = \frac{(159,3 - 61,4)1000}{(0,75)(164)(500)} = 1,59 \text{ mm}^2/\text{mm} \quad (440.1R, \text{ Persamaan (8.2c)})$$

Asumsi sengkang U diameter D13 ( $A_{fv} = 258 \text{ mm}^2$ )

$$s = \frac{258}{1,59} = 162 \text{ mm}$$

Periksa jarak sengkang maksimum yang diizinkan:

$$s = d/2 = 250 \text{ mm} \leq 600 \text{ mm} \quad 440.1R, \text{ Bagian.8.3}$$

karena

$$V_u - \phi V_c = 97,9 \text{ kN} < \phi 4 \sqrt{f'_c} b_w d = 196 \text{ kN} \quad \text{OK} \quad 318-11, \text{ Bagian. 11.4.5}$$

Spasi sengkang minimum berdasarkan tulangan geser minimum:

$$s = \frac{A_{fv, \min} f_{fv}}{0,35 b_w} = \frac{(258)(164)}{0,35(300)} = 403 \text{ mm} \quad 440.1R, \text{ Persamaan (8.2.2)}$$

Oleh sebab itu, spasi pada bagian kritis dilarang untuk yang terkecil dari 162 mm, 250 mm, dan 403 mm. Pilih spasi 150 mm pada bagian kritis.

Tentukan jarak  $x$  dimana dapat terjadi transisi spasi 250 mm (untuk memenuhi kekuatan dan syarat spasi maksimum yang dihitung diatas sebagai  $d/2 = 250 \text{ mm}$ ):

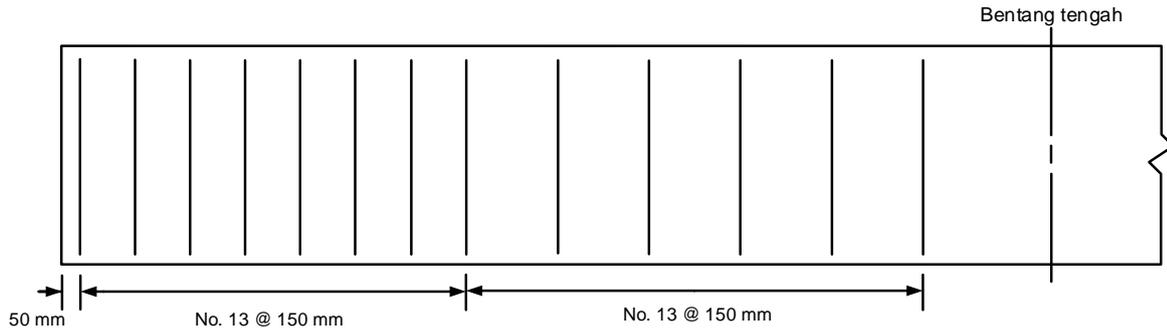
$$\frac{A_{fv}}{s} = \frac{(V_u - \phi V_c)}{\phi f_{fv} d} \quad 440.1R, \text{ Persamaan (8.2c)}$$

$$\frac{258}{250} = \frac{(V_u - \phi V_c)}{(0,75)(164)(500)1000}$$

Oleh sebab itu, sebuah transisi dapat dibuat dari spasi 150 mm menjadi 250 mm pada 0,99 m dari tumpuan.

7. Pilih pengaturan spasi sengkang yang memenuhi perhitungan sebelumnya.

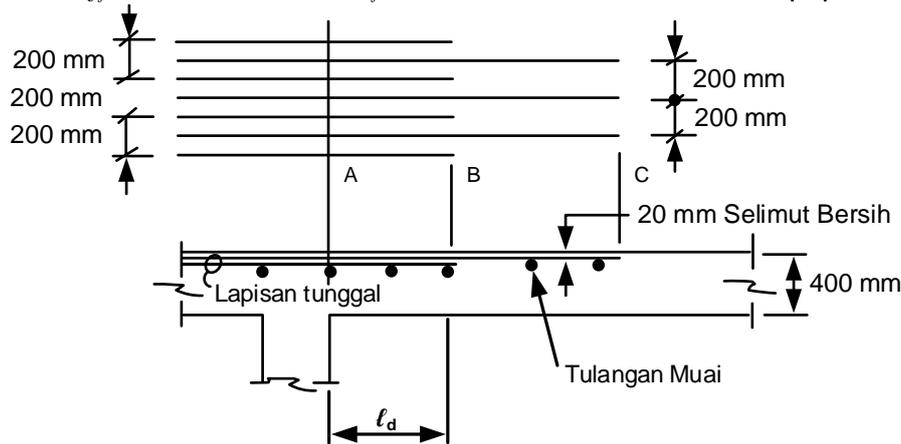
Letakkan sengkang pertama pada 50 mm dari tumpuan. Gunakan spasi 150 mm hingga 1,1 m dari tumpuan. Gunakan spasi 250 mm hingga 2,3 m dari tumpuan.



**CATATAN** Banyak perancang akan memilih spasi 250 mm melalui bentang tengah, 250 mm meskipun tidak dibutuhkan dari perhitungan tarik

**Contoh 9—Penyaluran tulangan tarik (terkontrol tekan atau penampang zona transisi)**

Contoh ini serupa dengan Contoh 4.2 dari PCA Notes on ACI 318-08. Hitung kebutuhan panjang penyaluran untuk GFRP D25 (alternatif batang pendek) tertanam pada pelat beton dengan berat normal satu arah yang diperlihatkan pada gambar berikut untuk mengembangkan kapasitas momen penuh pada Bagian A. Asumsi  $f'_c = 28$  MPa,  $f_{fu}^* = 550$  MPa, and  $E_f = 41.000$  MPa. Asumsi kondisi paparan interior.



**Perhitungan dan pembahasan**

Asumsi batang pendek disalurkan pada jarak AB sedangkan batang panjang disalurkan pada BC.

Sifat tulangan D25:

$d_b = 25,4$  mm  
 $A_{f,bar} = 510$  mm<sup>2</sup>

Sifat material desain:

$C_E = 0,8$   
 $f_{fu} = C_E f_{fu}^* = (0,8)(550) = 440$  MPa  
 (6.2a)

1. Tentukan tipe penampang.

$d = 400 - 20 - (25,4/2) = 367$  mm  
 $A_f = (510 \text{ mm}^2)/(100 \text{ mm spasi}) = 5,10 \text{ mm}^2/\text{mm} = 5100 \text{ mm}^2/\text{m}$  dari pelat

**Referensi**

440.6-08, Tabel 7.1

440.1R, Tabel 6.2  
 440.1R, Persamaan

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = \frac{5100}{(1000)(367)} = 0,01390 \quad 440.1R, \text{ Persamaan}$$

(7.2.1a)

Karena  $\rho_{fb} < \rho_f < 1,4\rho_{fb}$ , Penampang ada pada zona transisi. 440.1R, Persamaan

(7.2.3)

2. Tentukan tegangan pada tulangan tarik pada kondisi ultimit.

$$f_f = \sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85\beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu} - 0,5 E_f \varepsilon_{cu}} \leq f_{fu} \quad (440.1R, \text{ Eq. (7.2.2d)})$$

$$f_f = \sqrt{\frac{(123)^2}{4} + \frac{0,85(0,85)(28)}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu} - 0,5 E_f \varepsilon_{cu}} \leq f_{fu}$$

$$f_f = 366 \text{ MPa}$$

3. Tentukan panjang penyaluran.

$$\ell_d = \frac{\alpha \frac{f_{fr}}{0,083\sqrt{f'_c}} - 340}{13,6 + \frac{C}{d_b}} d_b \quad 440.1R, \text{ q. (10.3a)}$$

Tegangan tulangan yang perlu disalurkan adalah tegangan pada kondisi ultimit. Tidak perlu menyalurkan kekuatan penuh dari tulangan pada kasus ini.

$$f_{fr} = f_f = 366 \text{ MPa}$$

440.1R, Bagian.10.3

Faktor modifikasi posisi tulangan harus diambil sebesar = 1,5 karena lebih dari 300 mm beton dicetak di bawah tulangan. (ACI 440.1R, Bagian.10.1.1)

Spasi tulangan as ke as yang disalurkan = 200 mm

$$C = \min\left(d_c, \frac{\text{jarak antar as}}{2}\right) \leq 3,5d_b \quad 440.1R, \text{ Bagian.10.1}$$

$$C = \min\left(20, \frac{25,4}{2}, \frac{200}{2}\right) \leq 3,5(25,4) = \min(33,100) \leq 89$$

$$C = 33 \text{ mm}$$

$$\ell_d = \frac{\alpha \frac{f_{fr}}{0,083\sqrt{f'_c}} - 340}{13,6 + \frac{C}{d_b}} d_b = \frac{(1,5) \frac{(366)}{0,083\sqrt{28}} - 340}{13,6 + \frac{33}{25,4}} (25,4) = 1550 \text{ mm}$$

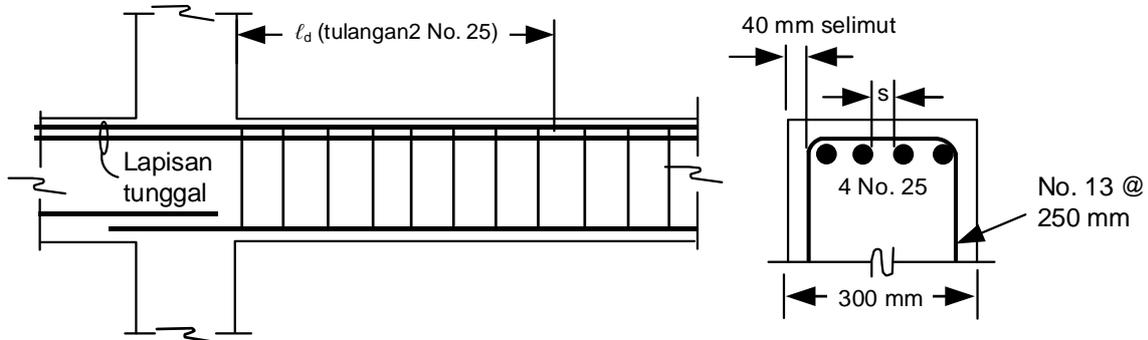
Panjang penyaluran yang dibutuhkan 1550 mm.

### Contoh 10— Penyaluran tulangan tarik (penampang terkontrol tarik)

Contoh ini serupa dengan Contoh 4.3 dari PCA Notes on ACI 318-08.

**SNI 8970:2021**

Hitung panjang yang dibutuhkan untuk penyalurkan dua GFRP D25 bagian dalam pada permukaan kolom pada gambar berikut. Dua tulangan D25 bagian luar dibuat menerus sepanjang bentang balok. Gunakan  $f'_c = 28$  MPa (beton berat normal),  $f_{fu}^* = 550$  MPa, dan  $E_f = 41.000$  MPa. Asumsi  $d = 700$  mm. Asumsi kondisi paparan interior.



**Perhitungan dan pembahasan**

**Referensi**

Sifat tulangan D25:

$d_b = 25,4$  mm  
 $A_{f,bar} = 510$  mm<sup>2</sup>

440.6-08, Tabel 7.1

Sifat material desain:

$C_E = 0,8$   
 $f_{fu} = C_E f_{fu}^* = (0,8)(550) = 440$  MPa  
 (6.2a)

440.1R, Tabel 6.2  
 440.1R, Persamaan

1. Tentukan tipe penampang.

$A_f = (4)(510 \text{ mm}^2) = 2040 \text{ mm}^2$

$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = \frac{2100}{(300)(700)} = 0,00957$

440.1R, Persamaan (7.2.1a)

$\rho_{fb} = 0,85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu} + f_{fu}}$

440.1R, Persamaan (7.2.1b)

$E_f \epsilon_{cu} = (41.000)(0,003) = 123$  MPa

$\rho_{fb} = 0,85(0,85) \frac{(28)}{(440)} \frac{(18,00)}{(123 + 440)} = 0,01004$

$\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} = \frac{0,00957}{0,01004} = 0,95$

440.1R, Persamaan (7.2.3)

Karena  $\rho_f \leq \rho_{fb}$ , penampang terkontrol tarik.

2. Tentukan tegangan pada tulangan tarik pada kondisi ultimit. Karena penampang terkontrol tarik

$f_f = f_{fu} = 440$  MPa

3. Tentukan panjang penyaluran.

$$\ell_d = \frac{\alpha \frac{f_{fr}}{0,083\sqrt{f'_c}} - 340}{13,6 + \frac{C}{d_b}} d_b$$

440.1R, Persamaan (10.3a)

$f_{fr} = f_f = 440$  MPa

440.1R, Persamaan 10.3

Faktor modifikasi lokasi tulangan harus diambil sebesar  $\alpha = 1,5$  karena lebih dari 300 mm beton dicetak di bawah tulangan.

ACI 440.1R, Bagian.10.1.1

Spasi bersih tulangan yang disalurkan

$$s = [300 - 2(40) - 2(12,7) - 4(25,4)]/3 = 31 \text{ mm}$$

$$C = \min\left(d_c, \frac{\text{jarak antar as}}{2}\right) \leq 3,5d_b$$

$$= \min\left(40 + 12,7 + \frac{12,7 + 31 + 12,7}{2}\right) \leq 3,5(25,4) = \min(65, 28) \leq 89$$

$$C = 28 \text{ mm}$$

440.1R, Bagian.10.1

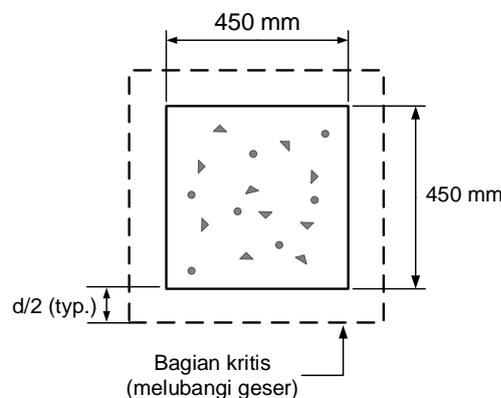
$$\ell_d = \frac{\alpha \frac{f_{fr}}{0,083\sqrt{f'_c}} - 340}{13,6 + \frac{C}{d_b}} d_b = \frac{(1,5) \frac{(440)}{0,083\sqrt{28}} - 340}{13,6 + \frac{28}{25,4}} (25,4) = 2010 \text{ mm}$$

Panjang penyaluran yang dibutuhkan 2010 mm.

### Contoh 11—Kekuatan geser pons slab pada kolom

Contoh ini serupa dengan Contoh 16.1 dari PCA *Notes on ACI 318-08*.

Tentukan aksi kekuatan geser pons dua arah pada tumpuan kolom interior dari sistem pelat rata untuk kondisi desain berikut.



Dimensi kolom = 450 mm x 450 mm

Tebal efektif pelat  $d = 165 \text{ mm}$

Kekuatan tekan beton  $f'_c = 28 \text{ MPa}$  (beton normal)

$E_f = 40.000 \text{ MPa}$

$\rho_f = 0,0120$  (tulangan lentur kolom pada kedua arah, bagian atas tulangan)

### Perhitungan dan pembahasan

1. Aksi geser pons dua arah (*punching shear*) tanpa tulangan geser:

$$V_u \leq \phi V_n$$

$$V_u \leq \phi V_c (V_f = 0)$$

2. Tentukan kekuatan geser dari beton.

### Referensi

440.1R, Bagian.8.1

440.1R, Bagian.8.2

## SNI 8970:2021

$$\phi V_c = \phi \left( \frac{k}{5} \right) 4 \sqrt{f'_c} b_o d \quad 440.1R, \text{ Persamaan}$$

(8.4b)

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} = 4700 \sqrt{28} = 24900 \text{ MPa} \quad 318-11, \text{Bagian. 8.5.1}$$

$$\rho_f n_f = \rho_f \frac{E_f}{E_c} = (0,0120) \left( \frac{40000}{24900} \right) = (0,0120)(1,606) = 0,01927$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad 440.1R, \text{ Persamaan (7.3.2.2b)}$$

$$= \sqrt{2(0,01927) + (0,01927)^2} - 0,01927 = 0,178$$

$$b_o = 4(450 + 82,5 + 82,5) = 2460 \text{ mm} \quad 440.1R, \text{Bagian. 8.4}$$

$$\phi V_c = 0,75 \left( \frac{0,178}{5} \right) 4 \sqrt{28} (2460) (165) \left( \frac{1}{1000} \right) = 229 \text{ kN}$$

## 12 Referensi

Dokumen komite ACI dan dokumen yang diterbitkan oleh organisasi lain diurutkan terlebih dahulu berdasarkan nomor dokumen, judul lengkap, dan tahun publikasi diikuti oleh dokumen yang diurutkan berdasarkan abjad.

### [American Concrete Institute](#)

216.1-07/TMS-0216-07, *Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies*

318-71, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary*

318-99, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*

318-08, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*

318-11, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*

360R-10, *Guide to Design of Slabs-on-Ground*

435R-95(00), *Control of Deflection in Concrete Structures (Appendix B added 2003)*

440R-07, *Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*

440.3 R-04, *Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures*

440.3 R-04(11), *Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons (Reapproved 2011)*

440.5-08, *Specification for Construction with Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars*

440.6-08, *Specification for Carbon and Glass Fiber-Reinforced Polymer Bar Materials for Concrete Reinforcement*

### [ASTM International](#)

ASTM D7205/D7205M-06(2011), *Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars*

ASTM D7337/D733M-12, *Standard Test Method for Tensile Creep Rupture of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars*

ASTM D7617/D7617M-11, *Standard Test Method for Transverse Shear Strength of Fiber-reinforced Polymer Matrix Composite Bars*

ASTM D7705/D7705M-12, *Standard Test Method for Alkali Resistance of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Matrix Composite Bars used in Concrete Construction*

ASTM E119-12a, *Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials.*

#### [Canadian Standards Association](#)

CAN/CSA-S6-06, *Canadian Highway Bridge Design Code*

CAN/CSA S6S1-10, *Canadian Highway Bridge Design Code*

CAN/CSA-S806-12, *Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers*

*Canadian Standards Association/Underwriters Laboratory Canada*

CAN/ULC-S101-M89, *Standard Methods of Fire Endurance Tests of Building Construction and Materials*

#### [International Organization for Standardization](#)

ISO 834-1:1999, *Fire-Resistance Tests – Elements of Building Construction – Part 1: General Requirements*

#### [Dokumen Tertulis](#)

Adimi, R.; Rahman, H.; Benmokrane, B.; and Kobayashi, K., 1998, "Effect of Temperature and Loading Frequency on the Fatigue Life of a CFRP Bar in Concrete," *Proceedings of the Second International Conference on Composites in Infrastructure (ICCI-98)*, Tucson, AZ, V. 2, pp.203-210.

Afifi, M. Z.; Mohamed, H. M.; and Benmokrane, B., 2013, "Axial Capacity of Circular Concrete Columns Reinforced with Glass – FRP Bars and Spirals," *11<sup>th</sup> International Conference on Fibre Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-11)*, Porto, Portugal, June 26-28, 10pp.

Ahmed, E. A.; El-Salakawy, E. F.; and Benmokrane, B., 2010a, "Shear Performance of RC Bridge Girders Reinforced with Carbon FRP Stirrups," *Journal of Bridge Engineering*, V. 15, No. 1, pp. 44-54. doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000035

Ahmed, E.A.; El-Salakawy, E. F.; and Benmokrane, B., 2010b, "Performance Evaluation of GFRP Shear Reinforcement Concrete Beams," *ACI Structural Journal*, V. 107, No. 1, J Feb., pp.53-62.

Ahmed, S.H.; Zia, P.; Yu, T.; and Xie, Y., 1993, "Punching Shear Tests of Slabs Reinforced with 3-D Carbon Fiber Fabric," *Concrete International*, V.16, No.6, June, pp.36-41.

Al-Dulaijan, S. U.; Nanni, A.; Al-Zahrani, M.M.; and Bakis, C. E., 1996, "Bond Evaluation of Environmentally Conditioned GFRP/Concrete System," *Proceedings of the Second International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*

- (ACMBS-2), M. M. El-Badry, ed., Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, QC, Canada, pp. 845-852.
- Almusallam, T. H.; Al-Salloum, Y.; Alsayed, S.; and Amjad, M., 1997, "Behavior of Concrete Beams Doubly Reinforced by FRP Bars," *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, V. 2, pp.471-478.
- Al-Zahrani, M. M.; Nanni, A.; Al-Dulaijan, S. U.; and Bakis, C. E., 1996, "Bond of FRP to Concrete for Rods with Axisymmetric Deformations," *Proceedings of the Second International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-II)*, Montreal, QC, Canada, pp. 853-860.
- Ando, N.; Matsukawa, H.; Hattori, A.; and Mashima, A., 1997, "Experimental Studies on the Long-Term Tensile Properties of FRP Tendons," *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, V. 2, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp.203-210.
- Arockiasamy, M.; Amer, A.; and Shahawy, M., 1998, "Environmental and Long-Term Studies on CFRP Cables and CFRP Reinforced Concrete Beams," *Proceedings of the First International Conference on Durability of Composites for Construction*, B. Benmokrane and H. Rahman, eds., Sherbrooke, QC, Canada, pp.599-610.
- Bakis, C. E., 1993, "FRP Composites: Materials and Manufacturing," *Fiber-Reinforced-Plastic for Concrete Structures: Properties and Applications*, A. Nanni, ed., Elsevier, Amsterdam, pp.13-58.
- Bakis, C. E., and Boothby, T. E., 2004, "Evaluation of Crack Width and Bond Strength in GFRP Reinforced Beams Subjected to Sustained Loads," *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures—ACMBS-IV*, M. El-Badry and L. Dunaszegi, eds. (CD-ROM)
- Bakis, C. E.; Freimanis, A. J.; Gremel, D.; and Nanni, A., 1998, "Effect of Resin Material on Bond and Tensile Properties of Unconditioned and Conditioned FRP Reinforcement Rods," *Proceedings of the First International Conference on Durability of Composites for Construction*, B. Benmokrane and H. Rahman, eds., Sherbrooke, QC, Canada, pp.525-535.
- Bakis, C.; Ospina, C.; Bradberry, T.; Benmokrane, B.; Gross, S.; Newhook, J.; and Thiagarajan, G., 2006, "Evaluation of Crack Widths in Concrete Flexural Members Reinforced with FRP Bars," *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, A. Mirmiran and A. Nanni, eds., Florida International University, Miami, FL, pp. 307-310.
- Bank, L. C., 1993, "Properties of FRP Reinforcement for Concrete," *Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Applications, Developments in Civil Engineering*, V. 42, A. Nanni, ed., Elsevier, Amsterdam, pp.59-86.
- Bank, L. C., and Puterman, M., 1997, "Microscopic Study of Surface Degradation of Glass Fiber-Reinforced Polymer Rods Embedded in Concrete Castings Subjected to Environmental Conditioning," *High Temperature and Environmental Effects on Polymeric Composites*, V. 2, ASTM STP 1302, T. S. Gates and A.-H. Zureick, eds., ASTM International, West Conshohocken, PA, pp.191-205.
- Bank, L. C.; Puterman, M.; and Katz, A., 1998, "The Effect of Material Degradation on Bond Properties of FRP Reinforcing Bars in Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 95, No. 3, May-June, pp. 232-243.
- Bank, L. C., and Xi, Z., 1995, "Punching Shear Behavior of Pultruded FRP Grating Reinforced Concrete Slabs," *Proceedings of the 2nd International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Ghent, Belgium, pp. 360-367.
- Banthia, N.; Al-Asaly, M.; and Ma, S., 1995, "Behavior of Concrete Slabs Reinforced with Fiber-Reinforced Plastic Grid," *Journal of Materials in Civil Engineering*, V. 7, No. 4, Nov., pp. 252-257. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(1995)7:4(252)
- Barkatt, A.; Bank, L. C.; Prian, L.; and Gentry, T. R.; 1998, "Accelerated Test Methods to Determine the Long-Term Behavior of Composite Highway Structures Subject to Environmental Loading," *Journal of Composites, Technology and Research*, V. 20, No. 1, Jan., pp. 38-50. doi:10.1520/CTR10499J

- Beaulieu-Michaud, M.-C. B.; Mohamed, H. M.; and Benmokrane, B., 2013, "Conception, Construction et Monitoring d'une Dalle de Grande Dimension en Béton Armé Polymères Renforcés de Fibre (PRF)," *Proceedings of the CSCE Annual General Meeting & Conference, Montreal, Québec, Canada, May 29-June 1*, 10pp.
- Belarbi, A., and Wang, H., 2012, "Durability of FRP Bars Embedded in Fiber-Reinforced-Concrete," *Journal of Composites for Construction*, V.16, No.4, pp.371-380. doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000270
- Bellakehal, H.; Zaidi, A.; Masmoudi, R.; and Bouhicha, M., 2013, "Combined Effect of Sustained Load and Freeze-Thaw Cycles on One-Way Concrete Slabs Reinforced with Glass Fibre-Reinforced Polymer," *Canadian Journal of Civil Engineering*, V. 40, No. 11, pp. 1060-1067. doi: 10.1139/cjce-2012-0514
- Benmokrane, B., 1997, "Bond Strength of FRP Rebar Splices," *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, V.2, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp.405-412.
- Benmokrane, B.; Ahmed, E.; Dulude, C.; and Boucher, E., 2012, "Design, Construction, and Monitoring of the First Worldwide Two Way Flat Slab Parking Garage Reinforced with GFRP Bars" *Sixth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Rome, Italy, June 13-15*, 8 pp.
- Benmokrane, B.; Chaallal, O.; and Masmoudi, R., 1996, "Flexural response of Concrete Beams Reinforced with FRP Reinforcing Bars," *ACI Structural Journal*, V. 93, No. 1, Jan.-Feb., pp.46-55.
- Benmokrane, B.; El-Salakawy, E.; Desgagné, G.; and Lackey, T., 2004, "FRP Bars for Bridges," *Concrete International*, V. 26, No. 8, pp.84-90.
- Benmokrane, B.; El-Salakawy, E.; El-Gamal, S.; and Goulet, S., 2007, "Construction and Testing of an Innovative Concrete Bridge Deck Totally Reinforced with Glass FRP Bars: Val-Alain Bridge on Highway 20 East," *Journal of Bridge Engineering*, V.12, No.5, Sept., pp.632-645. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0702 (2007) 12:5(632)
- Benmokrane, B., and Mohamed, M. H., 2014, "Extending the Service Life of Water Treatment Structures: Glass Fiber Reinforced Polymer Bars Used in Water Treatment Plant," *Concrete International*, V. 36, No. 2, Feb., pp40-45.
- Benmokrane, B., and Rahman, H., eds., 1998, "Durability of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction," *Proceedings of the First International Conference (CDCC '98)*, QC, Canada, Feb., 692pp.
- Bisby, L. A., and Kodur, V. K. R., 2007, "Evaluating the Fire Endurance of Concrete Slabs Reinforced with FRP Bars: Considerations for a Holistic Approach," *Composites. Part B, Engineering*, V. 38, No. 5-6, pp. 547-558. doi: 10.1016/j.compositesb.2006.07.013
- Bisby, L. A.; Green, M. F.; and Kodur, V. K. R., 2005, "Response to Fire of Concrete Structures that Incorporate FRP," *Progress in Structural Engineering and Materials*, V. 7, No. 3, pp. 136-149. doi: 10.1002/pse.198
- Bischoff, P., 2005, "Reevaluation of Deflection Prediction for Concrete Beams Reinforced with Steel and Fiber-Reinforced Polymer Bars," *Journal of Structural Engineering*, V. 131, No. 5, May, pp. 752-767. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:5(752)
- Bischoff, P. H., and Gross, S. P., 2011, "Equivalent Moment of Inertia Based on Integration of Curvature," *Journal of Composites for Construction*, V. 15, No. 3, pp.263-273. doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000164
- Bischoff, P.H.; Gross, S.P.; and Ospina, C.E., 2009, "The Story Behind the Proposed ACI 440 Changes for Prediction of Deflections in Reinforced Concrete," *Serviceability of Concrete Members Reinforced with Internal/External FRP Reinforcement*, ACI SP-264, T. Alkhardji, P. H. Bischoff, and C. E. Ospina, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp.53-76.
- Bischoff, P.H., and Scanlon, A., 2007, "Effective Moment of Inertia for Calculating Deflections of Concrete Members Containing Steel Reinforcement and Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement," *ACI Structural Journal*, V. 104, No. 1, pp.68-75.

- Boyle, H. C., and Karbhari, V. M., 1994, "Investigation of Bond Behavior between Glass Fiber Composite Reinforcements and Concrete," *Journal of Polymer-Plastic Technology Engineering*, V. 33, No. 6, pp. 733-753. doi:10.1080/03602559408013105
- Branson, D.E., 1965, "Instantaneous and Time-Dependent Deflections of Simple and Continuous Reinforced Concrete Beams," HPR Report No.7, Alabama Highway Department, Bureau of Public Roads, Montgomery, AL, Part 1, 78pp.
- Brown, V., 1997, "Sustained Load Deflections in GFRP- Reinforced Concrete Beams," *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, V. 2, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp. 495-502.
- Brown, V., and Bartholomew, C., 1996, "Long-Term Deflections of GFRP-Reinforced Concrete Beams," *Proceedings of the First International Conference on Composites in Infrastructure (ICCI-96)*, H. Saadatmanesh and M. R. Ehsani, eds., Tucson, AZ, pp. 389-400.
- Burgoyne, C., ed., 2001, "Non-Metallic Reinforcement for Concrete Structures—FRPRCS-5," *Proceedings, International Conference, Cambridge, UK*.
- Clarke, J., and Sheard, P., 1998, "Designing Durable FRP Reinforced Concrete Structures," *Proceedings of the First International Conference on Durability of Composites for Construction*, B. Benmokrane and H. Rahman, eds., Sherbrooke, QC, Canada, pp. 13-24.
- Chen, Y.; Davalos, J. F.; Ray, I.; and Kim, H.-Y., 2007, "Accelerated Aging Tests for Evaluations of Durability Performance of FRP Reinforcing Bars for Concrete Structures," *Composite Structures*, V.78, No. 1, Mar., pp. 101-111. doi: 10.1016/j.compstruct. 2005.08.015
- Chowdhury, E. U.; Eedson, R.; Bisby, L. A.; Green, M. F.; Bénichou, N.; and Kodur, V. K. R., 2011, "Mechanical Characterization of FRP Materials at High Temperature," *Fire Technology*, V. 45, No. 4, pp. 1-18.
- Conrad, J.O.; Bakis, C.E.; Boothby, T.E.; and Nanni, A., 1998, "Durability of Bond of Various FRP Rods in Concrete," *Proceedings of the First International Conference on Durability of Composites for Construction*, B. Benmokrane and H. Rahman, eds., Sherbrooke, QC, Canada, pp. 299-310.
- Coomarasamy, A., and Goodman, S., 1997, "Investigation of the Durability Characteristics of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Materials in Concrete Environment," *American Society for Composites—Twelfth Technical Conference, Dearborn, MI*.
- Cosenza, E.; Manfredi, G.; and Nanni, A., eds., 2001, "Composites in Construction: A Reality," *Proceedings, International Workshop, Capri, Italy, ASCE, Reston, VA, 277pp*.
- Curtis, P. T., 1989, "The Fatigue Behavior of Fibrous Composite Materials," *Journal of Strain Analysis*, V.24, No. 4, pp. 235-244. doi: 10.1243/03093247V244235
- Dally, J. W., and Riley, W. F., 1991, *Experimental Stress Analysis*, third edition, McGraw Hill, New York, 672 pp.
- Daniali, S., 1992, "Development Length for Fiber-Reinforced Plastic Bars," *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, K. W. Neale and P. Labossiere, eds., pp. 179-188.
- Darwin, D.; Zuo, J.; Tholen, M.; and Idun, E., 1996, "Development Length Criteria for Conventional and High Relative Rib Area Reinforcing Bars," *ACI Structural Journal*, V. 93, No. 3, May-June, pp. 347-359.
- De Luca, A.; Matta, F.; and Nanni, A., 2010, "Behavior of Full Scale Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Concrete Columns under Axial Load," *ACI Structural Journal*, 107, No. 5, Sept-Oct., pp.589-596.
- DeSimone, M. V., 2009, "Deflections of Continuous GFRP-Reinforced Concrete Beams," *MSCE thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Villanova University, Villanova, PA*.
- Deutsches Institut für Normung e.V., 2012, "German Standards for Testing of Hardened Concrete, Part1—Impermeability to Water," *DIN 1048*, pp.9-10.
- Devalapura, R. K.; Greenwood, M. E.; Gauchel, J. V.; and Humphrey, T. J., 1996, *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, M. M. El-Badry, ed., Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, QC, Canada, pp. 107-116.

- Dolan, C. W.; Rizkalla, S.; and Nanni, A., eds., 1999, *Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures*, SP-188, C.W. Dolan, S.H. Rizkalla, and A.Nanni, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1182pp.
- Dowden, D.M., and Dolan, C.W., 1997, "Comparison of Experimental Shear Data with Code Predictions for FRP Prestressed Beams," *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, V. 2, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp. 687-694.
- Drouin, B.; Latour, G.; and Mohamed, H., 2011, "More than 10 Years Successful Field Applications of FRP Bars in Canada," *CDCC 2011, The Fourth International Conference on Durability & Sustainability of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction and Rehabilitation*, Quebec City, QC, Canada, July, 6 pp.
- Dulude, C.; Hassan, M.; Ahmed, E. A.; and Benmokrane, B., 2013, "Punching Shear Behavior of Two-Way Flat Concrete Slabs Reinforced with GFRP Bars," *ACI Structural Journal*, V. 110, No. 5, Sept.-Oct., pp. 723-734.
- Ehsani, M. R., 1993, "Glass-Fiber Reinforcing Bars," *Alternative Materials for the Reinforcement and Prestressing of Concrete*, J.L. Clarke, Blackie Academic & Professional, London, UK, pp.35-54.
- Ehsani, M. R.; Saadatmanesh, H.; and Tao, S., 1995, "Bond of Hooked Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) Reinforcing Bars to Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 92, No. 4, July-Aug., pp. 391-400.
- Ehsani, M. R.; Saadatmanesh, H.; and Tao, S., 1996a, "Design Recommendation for Bond of GFRP Rebars to Concrete," *Journal of Structural Engineering*, V.122, No.3, pp. 247-254. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:3(247)
- Ehsani, M. R.; Saadatmanesh, H.; and Tao, S., 1996b, "Bond Behavior and Design Recommendations for Fiber-Glass Reinforcing Bars," *Proceedings of the First International Conference on Composites in Infrastructure (ICCI- 96)*, H. Saadatmanesh and M. R. Ehsani, eds., Tucson, AZ, pp. 466-476.
- El-Badry, M., ed., 1996, "Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-II)," *Proceedings of the Second International Conference*, Montreal, QC, Canada, 1027 pp.
- El-Ghandour, A. W.; Pilakoutas, K.; and Waldron, P., 2003, "Punching Shear Behavior of Fiber Reinforced Polymers Reinforced Concrete Flat Slabs: Experimental Study," *Journal of Composites for Construction*, V. 7, No. 3, pp. 258-265. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2003)7:3(258)
- El-Salakawy, E. F., and Benmokrane, B., 2003, "Design and Testing of a Highway Concrete Bridge Deck Reinforced with Glass and Carbon FRP Bars," *ACI Special Publication, Field Applications of FRP Reinforcement: Case Studies*, SP-215-2, Aug., pp.37-54.
- El-Salakawy, E. F.; Benmokrane, B.; and Desgagné, G., 2003, "Fibre-Reinforced Polymer Composite Bars for the Concrete Deck Slab of Wotton Bridge," *Canadian Journal of Civil Engineering*, V. 30, No.5, pp.861-870. doi:10. 1139/103-055
- El-Salakawy, E. F.; Benmokrane, B.; El-Ragaby, A.; and Nadeau, D., 2005, "Field Investigation on the First Bridge Deck Slab Reinforced with Glass FRP Bars Constructed in Canada," *Journal of Composites for Construction*, V. 9, No. 6, Dec., pp. 470-479. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2005)9:6(470)
- Faza, S. S., and GangaRao, H. V. S., 1990, "Bending and Bond Behavior of Concrete Beams Reinforced with Plastic Rebars," *Transportation Research Record*, V. 1290, pp. 185-193.
- Faza, S.S., and GangaRao, H.V.S., 1992, "Pre-and Post- Cracking Deflection Behaviour of Concrete Beams Reinforced with Fibre-Reinforced Plastic Rebars," *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, K.W.Neale and P. Labossiere, eds., Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, QC, Canada, pp. 151-160.
- Faza, S. S., and GangaRao, H. V. S., 1993a, "Theoretical and Experimental Correlation of Behavior of Concrete Beams Reinforced with Fiber Reinforced Plastic Rebars," *Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures—International Symposium*, SP-138, A.Nanni and C.W. Dolan, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 599-614.

- Faza, S. S., and GangaRao, H. V. S., 1993b, "Glass FRP Reinforcing Bars for Concrete," *Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Applications, Developments in Civil Engineering*, V.42, A. Nanni, ed., Elsevier, Amsterdam, pp. 167-188.
- fib, 2007, "FRP Reinforcement in RC Structures," *Bulletin No. 40, Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland.*
- fib, 2010, *Model Code for Concrete Structures (MC2010)*, Ernst and Son, Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland.
- Figueiras, J.; Juvandes, L.; and Furia, R., eds., 2001, "Composites in Construction," *Proceedings of the International Conference Composites in Construction—CCC2001, Portugal.*
- Freimanis, A. J.; Bakis, C. E.; Nanni, A.; and Gremel, D., 1998, "A Comparison of Pullout and Tensile Behaviors of FRP Reinforcement for Concrete," *Proceedings of the Second International Conference on Composites in Infrastructure (ICCI-98)*, V. 2, Tucson, AZ, pp.52-65.
- Frosch, J., 1999, "Another Look at Cracking and Crack Control in Reinforced Concrete," *ACI Structural Journal*, V. 96, No. May-June, pp.437-442.
- GangaRao, H. V. S., and Vijay, P. V., 1997a, "Design of Concrete Members Reinforced with GFRP Bars," *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, V. 1, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp. 143-150.
- GangaRao, H. V. S., and Vijay, P. V., 1997b, "Aging of Structural Composites under Varying Environmental Conditions," *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, V. 2, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp.91-98.
- Gao, D.; Benmokrane, B.; and Masmoudi, R., 1998a, "A Calculating Method of Flexural Properties of FRP-Reinforced Concrete Beam: Part 1: Crack Width and Deflection," *Technical Report, Department of Civil Engineering, University of Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada, 24pp.*
- Gao, D.; Benmokrane, B.; and Tighiouart, B., 1998b, "Bond Properties of FRP Rebars to Concrete," *Technical Report, Department of Civil Engineering, University of Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada, 27 pp.*
- Gentry, T. R., and Husain, M., 1999, "Thermal Compatibility of Concrete and Composite Reinforcements," *Journal of Composites for Construction*, V. 3, No. 2, pp. 82-86. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(1999)3:2(82)
- Gergely, P., and Lutz, L. A., 1968, "Maximum Crack Width in Reinforced Concrete Flexural Members," *Causes, Mechanism, and Control of Cracking in Concrete*, SP-20, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp.87-117.
- Gerritse, A., 1992, "Durability Criteria for Non-Metallic Tendons in an Alkaline Environment," *Proceedings of the First International Conference on Advance Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-I)*, Canadian Society of Civil Engineers, Sherbrooke, QC, Canada, pp. 129-137.
- Gremel, D., 2012, "Ensuring Electrical Isolation in Elevate Rail," *Concrete International*, V. 34, No. 2, Feb., pp.22-25.
- Gross, S.; Yost, J.; and Kevgas, G., 2003, "Time-Dependent Behavior of Normal and High Strength Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars Under Sustained Loads," *High Performance Materials in Bridges*, ASCE, Reston, VA, pp. 451-462.
- Hassan, M.; Ahmed, E. A.; and Benmokrane, B., 2013a, "Punching-Shear Strength of Normal- and High-Strength Concrete Flat Slabs Reinforced with GFRP Bars," *Journal of Composites for Construction*, V. 17, No. 6, Sept., 12 pp.
- Hassan, M.; Ahmed, E. A.; and Benmokrane, B., 2013b, "Punching Shear Strength of Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Concrete Flat Slabs," *Canadian Journal of Civil Engineering*, V. 40, No. 10, pp. 951-960. doi: 10.1139/cjce-2012-0177.
- Hayes, M. D.; Garcia, K.; Verghese, N.; and Lesko, J., 1998, "The Effect of Moisture on the Fatigue Behavior of a Glass/Vinyl Ester Composite," *Proceedings of the Second International Conference on Composites in Infrastructure (ICCI-98)*, V. 1, Tucson, AZ, pp.1-12.

- Hughes, B. W., and Porter, M. L., 1996, "Experimental Evaluation of Non-Metallic Dowel Bars in Highway Pavements," *Proceedings of the First International Conference on Composites in Infrastructure (ICCI-96)*, H. Saadatmanesh and M. R. Ehsani, eds., Tucson, AZ, pp.440-450.
- Humar, J., and Razaqpur, A. G., eds., 2000, "Advanced Composite Materials in Bridges and Structures," *Proceedings of the third International Conference*, Ottawa, ON, Canada.
- Iyer, S.L., and Sen, R., eds., 1991, "Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures," *Proceedings of the Specialty Conference*, ASCE, Reston, VA, 443pp.
- Jaeger, L. G.; Mufti, A.; and Tadros, G., 1997, "The Concept of the Overall Performance Factor in Rectangular-Section Reinforced Concrete Beams," *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, V.2, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp.551-558.
- Japan Society of Civil Engineers, 1997a, *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, V. 2, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp.511-518.
- Japan Society of Civil Engineers, 1997b, "Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials," *Concrete Engineering Series No. 23*, 325 pp.
- Japan Society of Civil Engineers Subcommittee on Continuous Fiber Reinforcement, 1992, *Proceedings of the Utilization of FRP-Rods for Concrete Reinforcement*, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan, 314 pp.
- Joint ACI-ASCE Committee 426, 1973, "The Shear Strength of Reinforced Concrete Members," *Journal of the Structural Division*, V. 99, No. 6, pp. 1091-1197.
- Kamal, A., and Boulfiza, M., 2011, "Durability of GFRP Rebars in Simulated Concrete Solutions under Accelerated Aging Conditions," *Journal of Composites for Construction*, V. 15, No. 4, pp. 473-481. doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000168
- Katz, A., 1998, "Effect of Helical Wrapping on Fatigue Resistance of GFRP," *Journal of Composites for Construction*, V. 2, No. 3, pp. 121-125. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(1998)2:3(121)
- Katz, A., 2000, "Bond to Concrete of FRP Rebars after Cyclic Loading," *Journal of Composites for Construction*, V. 4, No. 3, pp. 137-144. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2000)4:3(137)
- Katz, A., 2004, "Environmental Impact of Steel and Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Pavements," *Journal of Composites for Construction*, V. 8, No. 6, pp. 481-488. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:6(481)
- Katz, A.; Berman, N.; and Bank, L. C., 1999, "Effect of High Temperature on the Bond Strength of FRP Rebars," *Journal of Composites for Construction*, V. 3, No. 2, pp. 73-81. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(1999)3:2(73)
- Kobayashi, K., and Fujisaki, T., 1995, "Compressive Behavior of FRP Reinforcement in Non-Prestressed Concrete Members," *Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-2)*, Ghent, Belgium, pp. 26.
- Koc S.; Samaranayake, V. A.; and Nanni, A., 2005, "Tensile Characterization of Glass FRP Bars," *Composites. Part B, Engineering*, V. 36, No. 2, Jan., pp. 127-134. doi:10.1016/j.compositesb.2004.05.004
- Kodur, V. K. R., and Bisby, L. A., 2005, "Evaluation of Fire Endurance of Concrete Slabs Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars," *Journal of Structural Engineering*, V. 131, No. 1, Jan., pp. 34-43. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:1(34)
- Lee, J.H.; Yoon, Y.S.; and Mitchell, D., 2009, "Improving Punching Shear Behavior of Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Slabs," *ACI Structural Journal*, V. 106, No. 4, July-Aug., pp.427-434.
- Litherland, K. L.; Oakley, D. R.; and Proctor, B. A., 1981, "The Use of Accelerated Aging Procedures to Predict the Long Term Strength of GRC Composites," *Cement and Concrete Research*, V. 11, No. 3, pp. 455-466. doi: 10.1016/0008-8846(81)90117-4

- Liu, R., and Pantelides, C. P., 2012, "Shear Capacity of Concrete Slabs Reinforced with Glass-Fiber-Reinforced Polymer Bars using the Modified Compression Field Theory," *PCI Journal*, V. 57, No. 3, pp. 83-99. doi: 10.15554/pcij.06012012.83.99
- Liu, R., and Pantelides, C. P., 2013, "Shear Strength of GFRP Reinforced Precast Lightweight Concrete Panels," *Construction & Building Materials*, V. 48, No. 11, July, pp. 51-58. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.057
- Mallick, P. K., 1988, *Fiber Reinforced Composites, Materials, Manufacturing, and Design*, Marcell Dekker, Inc., New York, 469pp.
- Maluk, C.; Bisby, L. A.; Terrasi, G.; and Green, M. F., 2011, "Bond Strength of CFRP and Steel Bars in Concrete at Elevated Temperature," *Advances in Fire Design of Concrete Structures*, SP-279, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 1-36. doi: 10.14359/51682965
- Mandell, J. F., 1982, "Fatigue Behavior of Fiber-Resin Composites," *Developments in Reinforced Plastics*, V. 2, Applied Science Publishers, London, pp. 67-107.
- Mandell, J. F., and Meier, U., 1983, "Effects of Stress Ratio Frequency and Loading Time on the Tensile Fatigue of Glass-Reinforced Epoxy," *Long Term Behavior of Composites*, ASTM STP 813, ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 55-77.
- Masmoudi, R.; Masmoudi, A.; Ouezdou, M.; and Daoud, A., 2011, "Long-Term Bond Performance of GFRP Bars in Concrete under Temperature Ranging From 20°C to 80°C," *Construction & Building Materials*, V.25, No.2, pp.486-493. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.040
- Masmoudi, R.; Zaidi, A.; and Gérard, P., 2005, "Transverse Thermal Expansion of FRP Bars Embedded in Concrete," *Journal of Composites for Construction*, V. 9, No. 5, pp. 377-387. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2005)9:5(377)
- Matthys, S., and Taerwe, L., 2000, "Concrete Slabs Reinforced with FRP Grids. II: Punching Resistance," *Journal of Composites for Construction*, V. 4, No. 3, pp. 154-161. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2000)4:3(154)
- McClure, G., and Mohammadi, Y., 1995, "Compression Creep of Pultruded E-Glass-Reinforced-Plastic Angles," *Journal of Materials in Civil Engineering*, V. 7, No. 4, Nov., pp.269-276. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(1995)7: 4(269)
- Meier, U., 1992, "Carbon Fiber Reinforced Polymers: Modern Materials in Bridge Engineering," *Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering*, V. 2, No. 1, pp. 7-12. doi:10.2749/101686692780617020
- Michaluk, C.R.; Rizkalla, S.; Tadros, G.; and Benmokrane, B., 1998, "Flexural Behavior of One-Way Concrete Slabs Reinforced by Fiber Reinforced Plastic Reinforcement," *ACI Structural Journal*, V. 95, No. 3, May-June, pp. 353-364.
- Mindess, S.; Young, J.F.; and Darwin, D., 2003, *Concrete*, second edition, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 644pp.
- Mosley, C. P., 2002, "Bond Performance of Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement in Concrete," MStthesis, Purdue University, West Lafayette, IN.
- Mota, C.; Alminar, S.; and Svecova, D., 2006, "Critical Review of Deflection Formulas for FRP-RC Members," *Journal of Composites for Construction*, V. 10, No. 3, pp. 183-194. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:3(183)
- Mufti, A.; Onofrei, M.; Benmokrane, B.; Banthia, N.; Boulfiza, M.; Newhook, J.P.; Bakht, B.; Tadros, G.; and Brett, P., 2007, "Field Study of Glass-Fibre-Reinforced Polymer Durability in Concrete," *Canadian Journal of Civil Engineering*, V.34, No.3, pp.355-366. doi:10.1139/106-138
- Mufti, A. A.; Newhook, J.; Benmokrane, B.; Tadros, G.; and Vogel, H. M., 2011, "Durability of GFRP Rods in Field Demonstration Projects across Canada," *Proceedings of the 4th International Conference on Durability and Sustainability of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction and Rehabilitation*, CDCC2011, Quebec City, Canada, July 20-22, 9pp.
- Mutsuyoshi, H.; Uehara, K.; and Machida, A., 1990, "Mechanical Properties and Design Method of Concrete Beams Reinforced with Carbon Fiber Reinforced Plastics," *Transaction of the Japan Concrete Institute*, V. 12, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp. 231-238.

- Nagasaka, T.; Fukuyama, H.; and Tanigaki, M., 1993, "Shear Performance of Concrete Beams Reinforced with FRP Stirrups," *Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures—International Symposium, SP-138*, A. Nanni and C. W. Dolan, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 789-811.
- Nanni, A., ed., 1993a, "Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Applications," *Developments in Civil Engineering*, V.42, 450pp.
- Nanni, A., 1993b, "Flexural Behavior and Design of RC Members Using FRP Reinforcement," *Journal of Structural Engineering*, V. 119, No. 11, pp. 3344-3359. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:11(3344)
- Nanni, A., 2001, "Relevant Field Applications of FRP Composites in Concrete Structures," *Proceedings of the International Conference Composites in Construction—CCC2001*, J. Figueiras, L. Juvandes, and R. Faria, eds., Portugal. 661-670.
- Nanni, A.; Bakis, C. E.; Al-Zahrani, M. M.; Al-Dulaijan, S.U.; and Boothby, T. E., 1998a, "Effect of Cyclic Loading on Bond Behavior of GFRP Rods Embedded in Concrete Beams," *Journal of Composites, Technology and Research*, V. 20, No. 1, pp. 29-37. doi: 10.1520/CTR10498J
- Nanni, A.; Rizkalla, S.; Bakis, C. E.; Conrad, J. O.; and Abdelrahman, A. A., 1998b, "Characterization of GFRP Ribbed Rod Used for Reinforced Concrete Construction," *Proceedings of the International Composites Exhibition (ICE-98)*, Nashville, TN, pp. 16A/1-6.
- Nanni, A.; Bakis, C. E.; and Boothby, T. E., 1995, "Test Methods for FRP-Concrete Systems Subjected to Mechanical Loads: State of the Art Review," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, V. 14, pp. 524-588.
- Nanni, A., and Dolan, C. W., eds., 1993, *Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures—International Symposium, SP-138*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 977pp.
- Nanni, A.; Nenninger, J.; Ash, K.; and Liu, J., 1997, "Experimental Bond Behavior of Hybrid Rods for Concrete Reinforcement," *Structural Engineering & Mechanics*, V.5, No. 4, pp. 339-353. doi:10.12989/sem.1997.5.4.339
- National Research Council, 1991, "Life Prediction Methodologies for Composite Materials," *Committee on Life Prediction Methodologies for Composites, NMAB-460*, National Materials Advisory Board, Washington, DC, 66 pp.
- Nawy, E., and Neuwerth, G., 1977, "Fiberglass Reinforced Concrete Slabs and Beams," *Journal of the Structural Division*, V. 103, No. 2, Feb., pp. 421-440.
- Neale, K. W., and Labossiere, P., eds., 1992, "Advanced Composite Materials in Bridges and Structures," *Proceedings of the First International Conference (ACMBS-I)*, Sherbrooke, QC, Canada, 705 pp.
- Nigro, E.; Bilotta, A.; Cefarelli, G.; Manfredi, G.; and Cosenza, E., 2012, "Performance under Fire Situations of Concrete Members Reinforced with FRP Rods: Bond Models and Design Nomograms," *Journal for Composites in Construction*, V. 16, No. 4, pp.395-406.
- Nigro, E.; Cefarelli, G.; Bilotta, A.; Manfredi, G.; and Cosenza, E., 2011a, "Fire Resistance of Concrete Slabs Reinforced with FRP Bars. Part I: Experimental Investigations on the Mechanical Behavior," *Composites. Part B, Engineering*, V. 42, No. 6, pp. 1739-1750. doi: 10.1016/j.compositesb.2011.02.025
- Nigro, E.; Cefarelli, G.; Bilotta, A.; Manfredi, G.; and Cosenza, E., 2011b, "Fire Resistance of Concrete Slabs Reinforced with FRP Bars. Part II: Experimental Results and Numerical Simulations on the Thermal Field," *Composites. Part B, Engineering*, V. 42, No. 6, pp. 1751-1763. doi: 10.1016/j.compositesb.2011.02.026
- Nigro, E.; Cefarelli, G.; Bilotta, A.; Manfredi, G.; and Cosenza, E., 2013, "Adhesion at High Temperature of FRP Bars Straight or Bent at the end of Concrete Slabs," *Journal of Structural Fire Engineering*, V. 4, No. 2, June, pp. 71-86. doi: 10.1260/2040-2317.4.2.71
- Noritake, K.; Kakihara, R.; Kumagai, S.; and Mizutani, J., 1993, "Technora, an Aramid FRP Rod," *Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Applications, Developments in Civil Engineering*, V. 42, A. Nanni, ed., Elsevier, Amsterdam, pp. 267-290.

- Odagiri, T.; Matsumoto, K.; and Nakai, H., 1997, "Fatigue and Relaxation Characteristics of Continuous Aramid Fiber Reinforced Plastic Rods," *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, V. 2, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp.227-234.
- Okamoto, T.; Nagasaka, T.; and Tanigaki, M., 1994, "Shear Capacity of Concrete Beams Using FRP Reinforcement," *Journal of Structural Construction Engineering*, No. 455, pp. 127-136.
- Orangun, C.; Jirsa, J. O.; and Breen, J. E., 1977, "A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices," *ACI Journal Proceedings*, V. 74, No. 3, Mar., pp.114-122.
- Ospina, C. E., 2005, "Alternative Model for Concentric Punching Capacity Evaluation of Reinforced Concrete Two-Way Slabs," *Concrete International*, V.27, No. 9, Sept., pp.53-57.
- Ospina, C. E.; Alexander, S.; and Cheng, J. J., 2001, "Behaviour of Concrete Slabs with Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement," *Structural Engineering Report No. 242*, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, AB, Canada, 355 pp.
- Ospina, C. E.; Alexander, S. D. B.; and Cheng, J. J. R., 2003, "Punching of Two-way Concrete Slabs with Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars or Grids," *ACI Structural Journal*, V. 100, No. 5, Sept.-Oct., pp. 589-598.
- Ospina, C. E., and Bakis, C. E., 2007, "Indirect Flexural Crack Control of Concrete Beams and One-Way Slabs Reinforced with FRP Bars," *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-8)*, T.C. Triantafillou, ed., University of Patras, Greece. (CD-ROM).
- Ospina, C. E., and Gross, S. P., 2005, "Rationale for the ACI 440.1R-06 Indirect Deflection Control Design provisions," *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-7)*, SP-230, C. Shield, J. Busel, S. Walkup, and D. Gremel, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp.651-670.
- Pantelides, C. P.; Besser, B. T.; and Liu, R., 2012a, "One-Way Shear Behavior of Lightweight Concrete Panels Reinforced with GFRP Bars," *Journal of Composites for Construction*, V. 16, No. 1, Feb., pp. 2-9. doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000240
- Pantelides, C. P.; Liu, R.; and Reaveley, L. D., 2012b, "Lightweight Concrete Precast Bridge Deck Panels Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars," *ACI Structural Journal*, V. 109, No. 6, Nov.-Dec., pp. 879-888.
- Pantelides, C. P.; Gibbons, M. E.; and Reaveley, L. D., 2013, "Axial Load Behavior of Concrete Columns Confined with GFRP Spirals," *Journal of Composites for Construction*, V. 17, No. 3, June, pp. 305-313. doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000357
- Pearson, C.; Donchev, T.; and Limbachiya, M., 2011, "An Investigation into the Sustainability of FRP Reinforcement Bars," *CC-11 4<sup>th</sup> International Conference on Durability a sustainability of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction and Rehabilitation*, Quebec City, Canada, July, pp.71-80.
- Porter, M. L., and Barnes, B. A., 1998, "Accelerated Aging Degradation of Glass Fiber Composites," *Second International Conference on Composites in Infrastructure*, V.II, H.Saadatmanesh and M.R.Eshani, eds., University of Arizona, Tucson, AZ, pp.446-459.
- Porter, M. L.; Hughes, B. W.; Barnes, B. A.; and Viswanath, K. P., 1993, "Non-Corrosive Tie Reinforcing and Dowel Bars for Highway Pavement Slabs," *Report No. HR-343*, Iowa Highway Research Board and Iowa Department of Transportation, Ames, IA.
- Porter, M. L.; Mehus, J.; Young, K. A.; O'Neil, E. F.; and Barnes, B. A., 1997, "Aging for Fiber Reinforcement in Concrete," *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, V. 2, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp. 59-66.
- Portland Cement Association, 1990, "Concrete Floors on Ground," Skokie, IL, 36 pp.
- Portland Cement Association, 2008, *Notes on ACI 318-08 Building Code Requirements for Structural Concrete*, M. Kamara, L. Novak, and B. Rabbat, eds., Portland Cement Association, Skokie, IL, 1028pp.
- Priestley, M.N.; Seible, F.; and Calvi, G.M., 1996, *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley and Sons, New York, 704pp.

- Rahman, A.H.; Kingsley, C.Y.; and Crimi, J., 1996, "Durability of FRP Grid Reinforcement," *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, M.M.El-Badry, ed., Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, QC, Canada, pp. 681-690.
- Rahman, A. H., and Kingsley, C. Y., 1996, "Fatigue Behavior of a Fiber-Reinforced-Plastic Grid as Reinforcement for Concrete," *Proceedings of the First International Conference on Composites in Infrastructure (ICCI-96)*, H. Saadat-manesh and M.R.Ehsani, eds., Tucson, AZ, pp.427-439.
- Rahman, H.; Adimi, R.; and Crimi, J., 1997, "Fatigue Behavior of a Carbon FRP Grid Encased in Concrete," *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, V. 2, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp. 219-226.
- Rasheed, H. A.; Nayal, R.; and Melhem, H. G., 2004, "Response Prediction of Concrete Beams Reinforced with FRP Bars," *Composite Structures*, V.65, No.2, pp.193-204. doi: 10.1016/j.compstruct.2003.10.016
- Razaqpur, A. G.; Svecova, D.; and Cheung, M. S., 2000, "Rational Method for Calculating Deflection of Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Beams," *ACI Structural Journal*, V. 97, No. 1, Jan.-Feb., pp.175-185.
- Rizkalla, S. H., 1997, "A New Generation of Civil Engineering Structures and Bridges," *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, V. 1, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp. 113-128.
- Robert, M. and Benmokrane, B., 2010, "Behaviour of GFRP Reinforcing Bars Subjected to Extreme Temperature," *Journal of Composites for Construction*, V.14, No.4, pp.353-360
- Robert, M., and Benmokrane, B., 2013, "Combined Effects of Saline Solution and Moist Concrete on Long-Term Durability of GFRP Reinforcing Bars," *Journal of Construction and Building Materials*, V. 38, Jan, pp. 274-284. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.08.021
- Robert, M.; Cousin, P.; and Benmokrane, B., 2009, "Durability of GFRP Reinforcing Bars Embedded in Moist Concrete," *Journal of Composites for Construction*, V.13, No. 2, pp.66-73. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2009)13:2(66)
- Rostasy, F. S., 1997, "On Durability of FRP in Aggressive Environments," *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, V. 2, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp. 107-114.
- Roylance, M., and Roylance, O., 1981, "Effect of Moisture on the Fatigue Resistance of an Aramid-Epoxy Composite," *Organic Coatings and Plastics Chemistry*, American Chemical Society, Washington, DC, V. 45, pp.784-788.
- Saadatmanesh, H., and Ehsani, M. R., eds., 1998, "Fiber Composites in Infrastructure," *Proceedings of the Second International Conference on Composites in Infrastructure (ICCI-98)*, Tucson, AZ.
- Saadatmanesh, H., and Tannous, F. E., 1999a, "Relaxation, Creep, and Fatigue Behavior of Carbon Fiber-Reinforced Plastic Tendons," *ACI Materials Journal*, V. 96, No. 2, Mar.-Apr., pp. 143-153.
- Saadatmanesh, H., and Tannous, F. E., 1999b, "Long-Term Behavior of Aramid Fiber-Reinforced Plastic Tendons," *ACI Materials Journal*, V. 96, No. 3, May-June, pp. 297-305.
- Santoh, N., 1993, "CFCC (Carbon Fiber Composite Cable)," *Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Applications*, *Developments in Civil Engineering*, V. 42, A. Nanni, ed., Elsevier, Amsterdam, pp.223-247.
- Sasaki, I.; Nishizaki, I.; Sakamoto, H.; Katawaki, K.; and Kawamoto, Y., 1997, "Durability Evaluation of FRP Cables by Exposure Tests," *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, V. 2, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp.131-137.
- Scheibe, M., and Rostasy, F. S., 1998, "Stress-Rupture Behavior of AFRP Bars in Concrete and Under Natural Environment," *Second International Conference on Composites in Infrastructure*, V. II, H. Saadatmanesh and M. R. Eshani, eds., University of Arizona, Tucson, AZ, pp.138-151.

- Seki, H.; Sekijima, K.; and Konno, T., 1997, "Test Method on Creep of Continuous Fiber Reinforcing Materials," *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, V. 2, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp. 195-202.
- Sen, R.; Shahawy, M.; Sukumar, S.; and Rosas, J., 1998a, "Effect of Tidal Exposure on Bond of CFRP Rods," *Second International Conference on Composites in Infrastructure*, V.II, H. Saadatmanesh and M.R.Eshani, eds., University of Arizona, Tucson, AZ, pp. 512-523.
- Sen, R.; Shahawy, M.; Rosas, J.; and Sukumar, S., 1998b, "Durability of Aramid Pretensioned Elements in a Marine Environment," *ACI Structural Journal*, V. 95, No. 5, Sept.- Oct., pp.578-587.
- Shield, C.; French, C.; and Hanus, J., 1999, "Bond of GFRP Rebar for Consideration in Bridge Decks," *Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures*, SP-188, C. W. Dolan, S. H. Rizkalla, and A. Nanni, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 393-406.
- Shield, C.; French, C.; and Retika, A., 1997, "Thermal and Mechanical Fatigue Effects on GFRP Rebar-Concrete Bond," *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, V. 2, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp. 381-388.
- Shield, C., Galambos, T., and Gulbrandsen, P., 2011, "On the History and Reliability of the Flexural Strength of FRP Reinforced Concrete Members in ACI 440.1R," *10th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*, SP-275, R. Sen, R. Seracino, C. Shield, and W. Gold, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp.1-18.
- Sippel, T.M., and Mayer, U., 1996, "Bond Behavior of FRP Strands under Short-Term, Reversed and Cyclic Loading," *Proceedings of the Second International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-2)*, M.M.El-Badry, ed., Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, QC, Canada, pp.837-844.
- Sonobe, Y.; Fukuyama, H.; Okamoto, T.; Kani, N.; Kimura, K.; Kobayashi, K.; Masuda, Y.; Matsuzaki, Y.; Mochizuki, S.; Nagasaka, T.; Shimizu, A.; Tanano, H.; Tanigaki, M.; and Tenshigawara, M., 1997, "Design Guidelines of FRP Reinforced Concrete Building Structures," *Journal of Composites for Construction*, V. 1, No. 3, pp. 90-115. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(1997)1:3(90)
- Szerszen, M., and Nowak, A., 2003, "Calibration of Design Code for Buildings (ACI 318): Part 2—Reliability Analysis and Resistance Factors," *ACI Structural Journal*, V. 100, No. 3, May-June, pp. 383-391.
- Taerwe, L., ed., 1995, "Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures," *Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-2)*, Ghent, Belgium, 714 pp.
- Taerwe, L., 1997, "FRP Activities in Europe: Survey of Research and Applications," *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, V. 1, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp.59-74.
- Takewaka, K., and Khin, M., 1996, "Deterioration of Stress-Rupture of FRP Rods in Alkaline Solution Simulating as Concrete Environment," *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, M.M.El-Badry, ed., Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, QC, Canada, pp.649-664.
- Tamura, T., 1993, "FIBRA," *Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Applications*, *Developments in Civil Engineering*, V.42, A. Nanni, ed., Elsevier, Amsterdam, pp. 291-303.
- Tannous, F. E., and Saadatmanesh, H., 1999, "Durability of AR-Glass Fiber Reinforced Plastic Bars," *Journal of Composites for Construction*, V. 3, No. 1, pp. 12-19. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(1999)3:1(12)
- Teng, J.-G., ed., 2001, "FRP Composites in Civil Engineering," *Proceedings CICE 2001*, Hong Kong, China, V. 1 and 2.

- Tepfers, R., 2002, "Test System for Evaluation of Bond Properties of FRP Reinforcement in Concrete," *Proceedings of the Third International Symposium on Bond in Concrete—From Research to Standards, Budapest, Hungary*, pp.657-666.
- Theriault, M., and Benmokrane, B., 1998, "Effects of FRP Reinforcement Ratio and Concrete Strength on Flexural Behavior of Concrete Beams," *Journal of Composites for Construction*, V. 2, No. 1, pp.7-16. doi:10.1061/(ASCE) 1090-0268 (1998) 2:1(7)
- Tighiouart, B.; Benmokrane, B.; and Gao, D., 1998, "Investigation of Bond in Concrete Member with Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bars," *Construction and Building Materials Journal*, Dec., 10pp.
- Tighiouart, B.; Benmokrane, B.; and Mukhopadhyaya, P., 1999, "Bond Strength of Glass FRP Rebar Splices in Beams under Static Loading," *Construction & Building Materials*, V.13, No.7, pp.383-392. doi:10.1016/S0950-0618(99)00037-9
- Tobbi, H.; Farghaly, A. S.; and Benmokrane, B., 2012, "Concrete Columns Reinforced Longitudinally and Trans- versally with Glass Fiber-Reinforced Polymers Bars," *ACI Structural Journal*, V. 109, No. 4, July-Aug., pp. 551-558.
- Tokyo Rope, 2000, "CFCC, Carbon Fiber Composite Cable," *Product Circular No. 991-2T-SA*, Tokyo Rope Manufacturing Co., Tokyo, <http://www.tokyoropeco.jp/>
- Tomosawa, F., and Nakatsuji, T., 1996, "Evaluation of the ACM Reinforcement Durability by Exposure Test," *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, M. M. El-Badry, ed., Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, QC, Canada, pp. 699-706.
- Tomosawa, F., and Nakatsuji, T., 1997, "Evaluation of the ACM Reinforcement Durability by Exposure Test," *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures(FRPRCS-3)*, V. 2, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp. 139-146.
- Toutanji, H., and Saafi, M., 2000, "Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars," *ACI Structural Journal*, V. 97, No. 5, Sept.-Oct., pp. 712-719.
- Tureyen, A. K., and Frosch, R. J., 2002, "Shear Tests of FRP Reinforced Concrete Beams without Stirrups," *ACI Structural Journal*, V. 99, No. 4, July-Aug., pp. 427-434.
- Tureyen, A. K., and Frosch, R. J., 2003, "Concrete Shear Strength: Another Perspective," *ACI Structural Journal*, V. 100, No. 5, Sept.-Oct., pp. 609-615.
- Uomoto, T., 2000, "Durability of FRP as Reinforcement for Concrete Structures," *Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, ACMBS-3*, J. L. Humar and A. G. Razaq eds., Canadian Society for Civil Engineering, Montr C, Canada, pp.3-17.
- Uppuluri, V. S.; Bakis, C. E.; Nanni, A.; and Boothby, T. E., 1996, "Analysis of the Bond Mechanism in FRP Reinforcement Rods: The Effect of Rod Design and Properties," *Proceedings of the Second International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-II)*, Montreal, QC, Canada, pp.893-900.
- Vijay, P. V., and GangaRao, H. V. S., 1999, "Accelerated and Natural Weathering of Glass Fiber Reinforced Plastic Bars," *Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures, SP-188*, C. W. Dolan, S. H. Rizkalla, and A. Nanni, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 605-614.
- Vijay, P. V.; GangaRao, H. V. S.; and Kalluri, R., 1998, "Hygrothermal Response of GFRP Bars under Different Conditioning Schemes," *Proceedings of the First International Conference (CDCC 1998)*, Sherbrooke, QC, Canada, pp. 243-252.
- Wambeke, B., and Shield, C., 2006, "Development Length of Glass Fiber Reinforced Polymer Bars in Concrete," *ACI Structural Journal*, V. 103, No. 1, Jan.-Feb., pp.11-17.
- Wang, J., 1998, "Determination of the Shear Resistance of Concrete Beams and Slabs Reinforced with Fibre Rein- forced Plastics," MS thesis, Carleton University, Ottawa, ON, Canada.
- White, T. D., ed., 1992, "Composite Materials and Struc- tural Plastics in Civil Engineering Construction," *Proceedings of the Materials Engineering Congress*, ASCE, Reston, VA, pp.532-718.

- Wicaksono, S., and Chai, G. B., 2013, “A Review of Advances in Fatigue and Life Prediction of Fiber-Reinforced Composites,” *Journal of Materials Design and Applications*, V. 227, pp.179-195.
- Wu, W. P., 1990, “Thermomechanical Properties of Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bars,” PhD dissertation, West Virginia University, Morgantown, WV, 292 pp.
- Yamaguchi, T.; Kato, Y.; Nishimura, T.; and Uomoto, T., 1997, “Creep Rupture of FRP Rods Made of Aramid, Carbon and Glass Fibers,” *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, V. 2, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp.179-186.
- Ye, L. P.; Feng, P.; Zhang, K.; Lin, L.; Hong, W. H.; Yue, Q. R.; Zhang, N.; and Yang, T., 2003, “FRP in Civil Engineering in China: Research and Applications,” *Proceedings of the Sixth International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-6)*, K. H. Tan, ed., Singapore, 1401 pp.
- Yost, J.; Gross, S.; and Dinehart, D., 2003, “Effective Moment of Inertia for GFRP Reinforced Concrete Beams,” *ACI Structural Journal*, V.100, No.6, Nov.-Dec., pp.732-739.
- Zaidi, A., and Masmoudi, R., 2008, “Thermal Effect on Fiber Reinforced Polymer Reinforced Concrete Slabs,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, V. 35, No. 3, Mar., pp. 312-320. doi: 10.1139/L07-110
- Zaidi, A.; Masmoudi, R.; and Bouhicha, M., 2013, “Numerical Analysis of Thermal Stress-Deformation in Concrete Surrounding FRP Bars in Hot Region,” *Construction & Building Materials*, V. 38, Jan, pp. 204-213. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.047
- Zhao, W.; Maruyama, K.; and Suzuki, H., 1995, “Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced by FRP Rods as Longitudinal and Shear Reinforcement,” *Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-2)*, Ghent, Belgium, pp.352-359

## Lampiran A–Pelat di tanah

Dua jenis konstruksi yang paling umum untuk pelat pada tanah dibahas dalam lampiran ini: pelat beton dan pelat yang diperkuat dengan batang susut dan suhu.

### A.1 Desain pelat beton polos

Pelat beton di tanah yang sederhana menyalurkan beban ke tanah dasar dengan tekanan minimal dan dirancang untuk tetap tidak retak pada kondisi beban servis. Untuk mengurangi efek retak susut, spasi sambungan konstruksi, sambungan kontraksi, atau keduanya, biasanya dibatasi. Untuk detail metode desain pelat beton polos di tanah, lihat ACI 360R.

### A.2 Desain pelat dengan batang susut dan suhu

Ketika merancang pelat dengan batang susut dan suhu, pelat harus dianggap sebagai pelat beton biasa tanpa batang untuk menentukan ketebalannya. Pelat diasumsikan tidak retak ketika beban diaplikasikan pada permukaannya. Lebar dan jarak retak susut dibatasi oleh jumlah nominal dari batang FRP yang ditempatkan di bagian atas pelat. Tujuan utama dari batang susut adalah untuk mengontrol lebar retak yang terbentuk di antara sambungan. Batang susut tidak mencegah retak, juga tidak secara signifikan menambahkan kapasitas lentur pelat. Peningkatan ketebalan pelat dapat meningkatkan kapasitas lentur.

Walaupun pelat dimaksudkan untuk tetap tidak retak di bawah beban kondisi layan, batang digunakan untuk membatasi jarak dan lebar retak, memungkinkan penggunaan jarak sambungan yang lebih luas, meningkatkan kemampuan untuk mentransfer beban pada sambungan, dan menyediakan kekuatan cadangan setelah susut atau keretakan akibat suhu telah terjadi.

Metode seret tanah dasar sering digunakan untuk menentukan jumlah batang susut dan temperatur nonprategang yang diperlukan, tetapi metode ini tidak berlaku ketika batang prategang atau serat perkuatan yang didistribusikan secara acak digunakan (*Portland Cement Association* 1990). Saat menggunakan batang baja, persamaan *drag* adalah sebagai berikut :

$$A_s = \frac{\mu L w_{slab}}{2 f_{s,allow}} \quad (A.2a)$$

di mana  $A_s$  luas penampang baja per kaki, ( $\text{mm}^2$  per linier meter);  $f_{s,allow}$  adalah tegangan yang diizinkan pada baja, (MPa), umumnya diambil sebagai dua pertiga hingga seperempat dari  $f_y$ ;  $\mu$  adalah koefisien gesekan tanah dasar (1,5 direkomendasikan untuk lantai di tanah [*Portland Cement Association* 1990]);  $L$  adalah jarak antara sambungan, (m); dan  $w$  adalah beban mati pelat, ( $\text{N/m}^2$ ), biasanya diasumsikan  $24 \text{ N/m}^2$  per mm dari ketebalan *slab* (Karena modulus batang FRP yang lebih rendah, persamaan yang menentukan harus didasarkan pada regangan daripada tingkat tegangan ketika merancang batang FRP susut dan suhu. Pada tegangan yang diizinkan, regangan pada batang baja sekitar 0,0012; menerapkan regangan yang sama untuk FRP akan menghasilkan tekanan  $0,0012 E_f$ , dan Pers. (A.2a) dapat ditulis sebagai:

$$A_{f,sh} = \frac{\mu L w}{2(0,0012 E_f)} \quad (A.2b)$$

Persamaan (A.2b) juga dapat digunakan untuk menentukan jarak sambungan  $L$  untuk jumlah batang yang ditentukan. Tidak ada data eksperimental terkait pada aplikasi FRP pada pelat di tanah sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut untuk memvalidasi pendekatan ini.

## Lampiran B–Perkembangan sejarah

Perkembangan serat FRP dapat ditelusuri ke penggunaan komposit yang merebak setelah Perang Dunia II pada tahun 1940-an. Industri kedirgantaraan telah lama mengakui keuntungan dari kekuatan tarik yang tinggi dan bobot material yang ringan, dan selama Perang Dingin, kemajuan dalam industri kedirgantaraan dan pertahanan mengakibatkan terjadi peningkatan dalam penggunaannya. Selain itu, perkembangan ekonomi Amerika Serikat yang pesat menuntut penyediaan bahan-bahan murah untuk memenuhi permintaan konsumen. Pultrusi menawarkan metode yang cepat dan ekonomis untuk proses pembentukan profil yang konstan, dan material komposit cetak tarik telah digunakan untuk membuat tongkat golf dan tiang pancing. Namun, baru pada tahun 1960-an, bahan-bahan ini mulai dipertimbangkan secara serius untuk digunakan sebagai perkuatan dalam beton struktural.

Perluasan sistem jalan nasional pada tahun 1950-an meningkatkan kebutuhan untuk menyediakan material untuk pemeliharaan jalan sepanjang tahun. Sudah menjadi praktik umum untuk menggunakan garam untuk menghilangkan es di jembatan jalan raya dan, dan akibatnya, batang baja dalam struktur ini dan objek-objek lain mengalami korosi yang cukup serius, menjadikannya sebagai permasalahan utama dan menyebabkan biaya pemeliharaan menjadi tinggi. Berbagai solusi telah diteliti, antara lain menggunakan pelapis galvanis, pelapis berikat elektro-statis (resin bubuk), beton terimpregnasi polimer, pelapis epoksi, pelapis baja paduan, dan batang *Glass-FRP* (ACI 440R). Dari pilihan-pilihan ini, batang baja berlapis epoksi tampaknya menjadi solusi terbaik dan karena dapat diterapkan dalam lingkungan yang korosif. Batang FRP tidak dianggap sebagai solusi yang layak dan tidak tersedia secara komersil sampai akhir tahun 1970-an.

Awalnya, batang GFRP (*Glass FRP*) dianggap sebagai alternatif yang baik untuk menggantikan batang baja sebagai perkuatan untuk beton polimer karena penggunaannya akan menghilangkan kebutuhan untuk mengatasi ketidakcocokan karakteristik ekspansi termal antara beton polimer dan batang baja. Pasar pada tahun 1980-an menuntut perkuatan nonlogam untuk teknologi canggih yang spesifik. Permintaan terbesar untuk perkuatan listrik nonkonduktif adalah untuk fasilitas yang memiliki peralatan medis MRI. Batang FRP menjadi standar dalam tipe konstruksi seperti ini. Penggunaan lain yang dikembangkan untuk memanfaatkan keunggulan batang FRP supaya menjadi lebih dikenal dan diinginkan, khususnya dalam konstruksi dinding laut, basis reaktor gardu induk, landasan pacu bandara, dan laboratorium elektronik (Brown and Bartholomew 1996).

Kekhawatiran terhadap kerusakan jembatan akibat korosi yang diakibatkan oleh ion klorida telah ada sejak tahun 1970-an, dan dampak terhadap jembatan yang berumur tua di Amerika Serikat terlihat jelas (Boyle and Karbhari 1994). Selain itu, teknologi deteksi terjadinya korosi di batang lapis epoksi yang telah biasa digunakan turut meningkatkan minat dalam metode alternatif untuk menghindari korosi. Sehingga, batang FRP mulai dianggap sebagai solusi umum untuk mengatasi masalah korosi pada dek jembatan dan struktur lainnya (Benmokrane et al. 1996).

## Lampiran C–Sejarah penggunaan

Hingga pertengahan tahun 1990-an, Jepang telah memiliki aplikasi batang FRP paling banyak, dengan lebih dari 100 proyek komersial. Ketentuan desain serat berpolimer telah tercantum dalam rekomendasi desain dan konstruksi dari *Japanese Society of Civil Engiering* (1997b). Pada tahun 2000-an, China menjadi pengguna terbesar perkuatan komposit dalam proyek konstruksi baru, aplikasinya terdiri dari dek jembatan hingga pekerjaan bawah tanah (Ye et al. 2003).

Penggunaan batang FRP di Eropa dimulai di Jerman dengan proyek pembangunan jembatan jalan raya dengan FRP prategang pada tahun 1986 (Meier 1992). Sejak pembangunan jembatan tersebut, berbagai program telah dilaksanakan untuk meningkatkan studi dan penggunaan dari batang FRP di Eropa (Taerwe 1997).

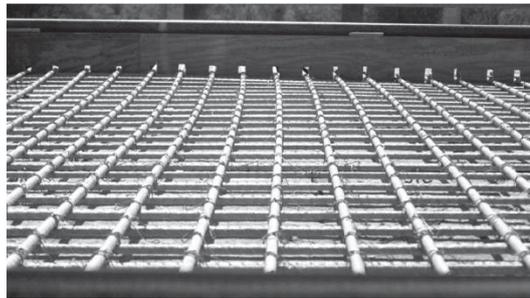
Insinyur-insinyur sipil Kanada telah mengembangkan peraturan/ketentuan untuk penggunaan semen FRP dalam peraturan *Canadian Highway Bridge Design Code* (C / CSA-S6-06) dan telah membangun sejumlah struktur beton yang menggunakan FRP. Jembatan Headingley di Manitoba menggunakan perkuatan CFRP dan GFRP (Rizkalla 1997). Jembatan Floodway di atas Sungai Merah di Winnipeg, MB, Kanada, selesai dibangun pada tahun 2006. Jembatan tersebut terdiri dari 16 bentang, masing-masing berukuran sekitar 50 x 143 kaki (15,3 x 43,5 m). Seluruh elemen beton yang terletak di atas balok utama diperkuat dengan balok GFRP. Proyek ini menggunakan 310.000 lb (140.000 kg) batang GFRP, menjadikannya sebagai jembatan beton bertulang nonlogam terbesar di dunia. Selain itu, beberapa jembatan juga telah dibangun di Quebec menggunakan batang GFRP di dek, seperti pada Jembatan Wotton di Wotton, Jembatan Magog di Highway 55 North, Jembatan Cookshire-Eaton di Rute 108, dan Jembatan Val-Alain di Jalan Raya 20 Timur (El-Salakawy dan Benmokrane 2003; El-Salakawy dkk. 2003, 2005; Benmokrane dkk. 2004, 2007). Beberapa jembatan ini telah beroperasi selama lebih dari 10 tahun tanpa tanda-tanda penurunan kualitas dari perkuatan GFRP (Mufti et al. 2007, 2011). Akibatnya, terjadi peningkatan yang luar biasa dalam penggunaan balok GFRP di Kanada di mana terdapat lebih dari 200 struktur jembatan telah berhasil dibangun. Batang FRP lurus dan bengkok digunakan untuk konstruksi pelat lantai, untuk penghalang beton dan *girder* jembatan, atau keduanya (Drouin et al. 2011). Selain itu, balok GFRP telah digunakan di Kanada untuk struktur beton lainnya seperti garasi parkir (Benmokrane et al. 2012), trotoar beton jalan raya (Benmokrane et al. 2007), tangki air (Benmokrane dan Mohamed 2014), dan insinerator (Beau - lieu-Michaud et al. 2013). Di Amerika Serikat, penggunaan tipikal batang FRP telah sebelumnya telah dilaporkan (ACI 440R).



**Gambar C.1 – Konstruksi dek yang diperkuat dengan FRP di Lima, OH (Jembatan Pierce Street), pada 1999**



**Gambar C.2 – Batang GFRP digunakan untuk konstruksi dek di Dayton, OH, Jembatan Salem Avenue pada 1999**

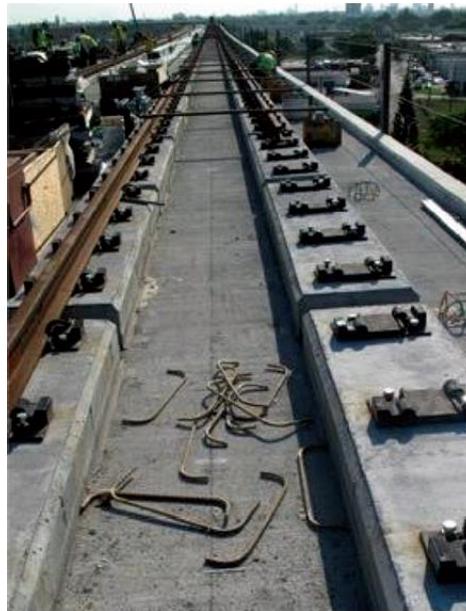


**Gambar C.3 – Tampak transversal dari GFRP pada Jembatan Sierrita de la Cruz Creek dekat Amarillo, TX, pada 2000**

Gambar C.1, Gambar C.2, dan Gambar C.3 menunjukkan aplikasi FRP dalam konstruksi dek jembatan. Penggunaan batang GFRP dalam penambahan ruang rumah sakit MRI menjadi hal yang umum. Aplikasi lainnya, seperti konstruksi tepi laut, pemasangan mat untuk dek jembatan, berbagai aplikasi pracetak, dan beton ornamen dan arsitektur, juga menjadi lebih umum. Beberapa proyek terbesar mencakup Gedung Gonda di Mayo Clinic di Rochester, MN; Institut Kesehatan Nasional di Bethesda, MD, untuk aplikasi MRI; jembatan di RM 1061 di Sierrita de la Cruz Creek di Potter County, TX, dan jembatan di 53rd Avenue di Bettendorf, IA, untuk aplikasi perkuatan dek (Nanni 2001). Batang *Glass-FRP* membuat gebrakan dalam mendukung percepatan konstruksi jembatan dengan aplikasi pada panel dek beton pracetak. Salah satu contoh aplikasinya adalah Jembatan Taman Emma di Utah yang dibangun pada tahun 2009. Batang *Glass-FRP* digunakan di atas dan bawah mat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar C.4. Pada tahun 2011 di Miami, FL, 3,9 mil (3,9 km), batang GFRP digunakan dalam alas rel (Gambar C.5) untuk AirportLink, yang menghubungkan Stasiun Earlington Heights ke Pusat Antar-Moda Miami (MIC) yang baru. Batang *Glass-FRP* dipilih, karena mereka menyediakan insulasi listrik pada dasar rel. Didesain oleh Departemen Transportasi Florida, Pusat Antar-Moda Miami (MIC) adalah pusat transportasi utama yang berfungsi sebagai titik transfer ke berbagai moda transportasi, termasuk Metrorail, Metrobus, Tri-Rail, Amtrak, bus antarkota, bus wisata, taksi, mobil sewaan, serta koneksi untuk *Automated People Mover* (APM) ke Bandara Internasional Miami (Gremel 2012).



**Gambar C.4 – Panel dek Jembatan Emma Park dengan batang GFRP pada sisi atas dan bawah pelat**



**Gambar C.5 – Batang GFRP digunakan untuk alas rel kereta api**



**Gambar C.6 – Konstruksi dinding laut dengan batang GFRP**



**Gambar C.7 – Jembatan I-635 diatas State Ave. (Kansas City, KS)**

Dinding laut yang dibangun menggunakan batang GFRP digunakan pada lingkungan dengan kadar garam yang tinggi untuk mengakomodasi umur layan yang panjang. Sebagai contoh adalah tembok laut yang melindungi Honoapi-ilani Highway, Maui, HI. Pertama kali dibangun pada tahun 2001 dengan batang baja konvensional, tembok laut ini membutuhkan penggantian batang pada tahun 2012, sebagai ditunjukkan pada Gambar C.6.

Batang *Glass-FRP* juga ditemukan pada jembatan lalu lintas dengan volume yang besar dan arus lalu lintas yang tinggi. Pada tahun 2013, dek jembatan I-635 di atas State Avenue di Kansas City, KS diganti dengan batang GFRP cor ditempat. Gambar C.7 menunjukkan batang GFRP di mat atas dan bawah panel dek yang digunakan pada jembatan 9,8 m x 70,7 m. Penawaran biaya konstruksi untuk proyek ini adalah sama untuk biaya pemasangan perkuatan epoksi serta GFRP.

Pada konstruksi terowongan, batang GFRP digunakan pada bagian dinding beton yang akan digali oleh mesin pemboran terowongan, telah menjadi praktik konstruksi umum di banyak wilayah metropolitan utama di dunia.

“Hak cipta Badan Standardisasi Nasional, copy standar ini dibuat untuk KT 91-06 Pekerjaan Teknik Sipil Dan Bangunan Gedung, dan tidak untuk dikomersialkan”

## Informasi pendukung terkait perumus standar

### [1] Komite Teknis perumus SNI

Komite Teknis 91-06 Pekerjaan Teknik Sipil Dan Bangunan Gedung.

### [2] Susunan keanggotaan Komite Teknis perumus SNI

Ketua : Ir. Ridwan Marpaung, MT  
 Wakil Ketua : Ferri Eka Putra, ST, MDM  
 Sekretaris : Rudi Setiadji Agustiningtyas, ST, M.Sc  
 Anggota : 
 

1. Erwin Lim, ST, MS, Ph.D
2. Prof. Bambang Suryoatmono
3. Prof. Tavio, ST, MT, Ph.D
4. Dr. Ir. Djoni Simanta, M.T.
5. Ir. Grace Indriani Sandika, MT
6. Dr. Ir. Hari Nugraha Nurjaman
7. Ir. Suradjin Sutjipto, MS
8. Dr. Ir. Nathan Madutujuh, M.Sc

Pada saat perumusan SNI, susunan keanggotaan Sub Komite Teknis 91-01-S4 Bahan, Sains, Struktur dan Konstruksi Bangunan. adalah sebagai berikut:

Ketua : Prof. Dr. Ir. Arief Sabaruddin, CES  
 Wakil Ketua : Ir. Lutfi Faizal  
 Sekretaris : Dany Cahyadi, S.T., M.T.  
 Anggota : 
 

1. Ir. RG Eko Djuli Sasongko, M.M.
2. Prof. Dr. Ir. Suprpto, M.Sc., FPE., IPM.
3. Dr. Ir. Johannes Adhijoso Tjondro, M.Eng
4. Ir. Asriwiyanti Desiani, M.T.
5. Ir. Felisia Simarmata
6. Ir. Suradjin Sutjipto, MS
7. Dr. Ir. Hari Nugraha Nurjaman
8. Prof. Bambang Suryoatmono, Ph.D

### [3] Konseptor Penyusun SNI

No.	Nama	Instansi
<b>Tim Penasehat</b>		
1	Prof. Iswandi Imran, MASc., Ph.D	Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung (ITB)
2	Prof. Bambang Suhendro, M.Sc, Ph.D	Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada (UGM)
<b>Tim Teknis</b>		
3	Prof. Dr. Ir. Antonius	Universitas Islam Sultan Agung
4	Ir. Lutfi Faizal	Puslitbang Perumahan dan Permukiman, Kem.PUPR
5	Prof. Dr. Ir. Han Ay Lie, M.Eng	Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
6	Prof. Dr. Ir. Sri Tudjono, MS	Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
7	Dr. Ir. Junaedi Utomo, M.Eng	Universitas Atma Jaya Yogyakarta
8	Dr.-Ing. Ir. Andreas Triwiyono	Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada (UGM)
9	Ir. Faimun, M.Sc, Ph.D	Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan - Institut teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

No.	Nama	Instansi
10	Dr. Eng. Aris Aryanto, MT	Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung (ITB)
11	Patria Kusumaningrum, ST, Ph.D	
12	Ir. Sutadji Yuwasdiki, Dipl.E.Eng	
13	Lasino, ST, APU	Balai Litbang Bahan dan Struktur Bangunan, Puslitbang Perumahan dan Permukiman
14	Ir. Aventi, MT	
15	Moh. Rusli, ST, MDM	
16	Lena Tri Lestari, ST	Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
17	Dwinita Fibriani Astuti, ST	Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

#### [4] Sekretariat pengelola Komite Teknis/Subkomite Teknis perumus SNI

Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan, Direktorat Jenderal Cipta Karya, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.