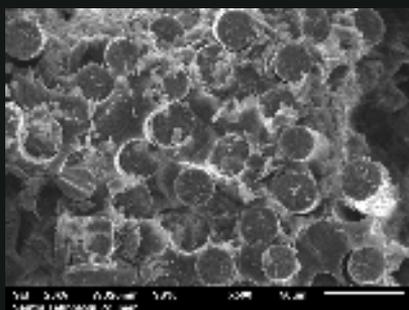




Karakterisasi *Pultruded Fiber Reinforced Polimer (PFRP)*

dan Konsep Perencanaan Jembatan Berbahan Material Komposit



Winarputro Adi R.

Karakterisasi ***Pultruded Fiber Reinforced Polimer (PFRP)***

dan Konsep Perencanaan Jembatan
Berbahan Material Komposit



PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN JALAN DAN JEMBATAN

Badan Penelitian dan Pengembangan
Kementerian Pekerjaan Umum

www.pusjatan.pu.go.id

KARAKTERISASI *PULTRUDED FIBER REINFORCED POLIMER (PFRP)* DAN KONSEP PERENCANAAN JEMBATAN BERBAHAN MATERIAL KOMPOSIT

Winarputro Adi R.

Desember, 2013

Cetakan Ke-1 2013, 76 halaman

© Pemegang Hak Cipta Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan

Foto Cover : jansonbridging.com. Inset (kiri ke kanan) : dokumentasi Pusjatan oleh Winarputro Adi R.

No. ISBN : 978-602-264-036-3

Kode Kegiatan : PPK2-001-107-A-13

Kode Publikasi : IRE-TR-105-IN-2013

Kata kunci : karakterisasi PFRP, konsep LRFD, komposit

Ketua Program Penelitian:

(Retno Setiati, Puslitbang Jalan dan Jembatan)

Ketua Sub Tim Teknis:

(Prof. (R). Ir. Lanneke Tristanto, Puslitbang Jalan dan Jembatan)

Naskah ini disusun dengan sumber dana APBN Tahun 2013, pada paket pekerjaan Penyusunan Naskah Ilmiah Pengembangan Material Komposit untuk Struktur Jembatan Sementara.

Pandangan yang disampaikan di dalam publikasi ini tidak menggambarkan pandangan dan kebijakan Kementerian Pekerjaan Umum, unsur pimpinan, maupun institusi pemerintah lainnya.

Kementerian Pekerjaan Umum tidak menjamin akurasi data yang disampaikan dalam publikasi ini, dan tanggung jawab atas data dan informasi sepenuhnya dipegang oleh penulis.

Kementerian Pekerjaan Umum mendorong percetakan dan memperbanyak informasi secara eksklusif untuk perorangan dan pemanfaatan nonkomersil dengan pemberitahuan yang memadai kepada Kementerian Pekerjaan Umum. Pengguna dibatasi dalam menjual kembali, mendistribusikan atau pekerjaan kreatif turunan untuk tujuan komersil tanpa izin tertulis dari Kementerian Pekerjaan Umum.

Diterbitkan oleh:

Kementerian Pekerjaan Umum

Badan Penelitian dan Pengembangan

Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan

Jl. A.H. Nasution No. 264 Ujungberung - Bandung 40293

Pemesanan melalui:

Perpustakaan Puslitbang Jalan dan Jembatan

info@pusjatan.pu.go.id



Puslitbang Jalan dan Jembatan

Pusat Litbang Jalan dan Jembatan (Pusjatan) adalah institusi riset yang dikelola oleh Badan Litbang Kementerian Pekerjaan Umum Republik Indonesia. Lembaga ini mendukung Kementerian PU dalam menyelenggarakan jalan di Indonesia dengan memastikan keberlanjutan keahlian, pengembangan inovasi, dan nilai-nilai baru dalam pengembangan infrastruktur.

Pusjatan memfokuskan dukungan kepada penyelenggara jalan di Indonesia, melalui penyelenggaraan litbang terapan untuk menghasilkan inovasi teknologi bidang jalan dan jembatan yang bermuara pada standar, pedoman, dan manual. Selain itu, Pusjatan mengemban misi untuk melakukan advis teknik, pendampingan teknologi, dan alih teknologi yang memungkinkan infrastruktur Indonesia menggunakan teknologi yang tepat guna.

KEANGGOTAAN TIM TEKNIS & SUB TIM TEKNIS

Tim Teknis

Prof.(R).DR. Ir. M.Sjahanulirwan, MSc.
Ir. Agus Bari Sailendra, MT
Ir. I Gede Wayan Samsi Gunarta, M.Appl.Sc
DR. Ir. Dadang Mohammad, M.Sc
DR. Ir. Poernornosidhi, M.Sc
DR. Drs. Max Antameng, MA
DR. Ir. Hedy Rahadian, M.Sc
Ir. Iwan Zarkasi, M.Eng.Sc
Prof.(R).Ir. Lanneke Tristanto
Prof.(R).DR. Ir. Furqon Affandi, M.Sc
Ir. GJW Fernandez
Ir. Joko Purnomo, MT
Ir. Soedarmanto Darmonegoro
Ir. Lanny Hidayat, M.Si
Ir. Moch. Tranggono, M.Sc
DR. Ir. Djoko Widayat, M.Sc
Redrik Irawan, ST., MT.
DR. Ir. Didik Rudjito, M.Sc
DR. Ir. Triono Jumono, M.Sc
Ir. Palgunadi, M.Eng, Sc
DR. Ir. Doni J. Widiantonono, M.Eng.Sc
Ir. Teuku Anshar

Ir. Gandhi Harahap, M.Eng.Sc
Ir. Yayan Suryana, M.Sc
DR. Ir. Rudy Hermawan, M.Sc
Ir. Saktyanu, M.Sc
Ir. Herman Darmansyah
Ir. Rachmat Agus
DR. Ir. Hasroel, APU
DR. Ir. Chaidir Amin, M.Sc
Prof. Ir. Masyhur Irsyam, MSE. Ph.D
Kemas Ahmad Zamhari
Dr. Ir. Mochammad Amron, M.Sc
Djoko Mujanto

Sub Tim Teknis

Prof.(R).Ir. Lanneke Tristanto
Ir. Rahadi Sukirman
Herbudiman, ST., MT.
Abinhot Sihotang, ST., MT.
Ir. Samun Haris, MT.
DR. Made Suangga
DR. Aswandy
Ir. Ahmad Yunaldi

Kata Pengantar

Saat ini *Fiber Reinforced Polimer* (FRP) menjadi *trend* di dunia baik di bidang transportasi, industri, infrastruktur, hingga permukiman. FRP dipilih sebagai alternatif material struktur oleh karena rasio strength terhadap berat sendiri yang sangat tinggi disamping memiliki sifat lainnya seperti non konduktif, anti korosi, dan sebagainya.

Di Indonesia penggunaan material FRP khususnya untuk infrastruktur seperti jembatan masih belum berkembang. Penggunaannya masih terbatas pada aplikasi perkuatan jembatan. Namun demikian, Indonesia telah memproduksi komposit polimer yang berbentuk profil yang saat ini diaplikasikan untuk struktur gording pada atap dan dapat digunakan untuk elemen jembatan. Tetapi diperlukan kajian guna mengetahui dasar-dasar perencanaan beserta karakteristik bahan polimer tersebut.

Pada naskah ilmiah ini dibahas *state of the art* konsep perencanaan struktur dengan bahan komposit polimer, karakterisasi bahan polimer komposit yang diproduksi di Indonesia, beserta konsep analisis sistem sambungan. Diharapkan dengan adanya buku ini, dapat memberikan gambaran tentang karakteristik FRP serta cara perencanaan struktur komposit. Namun demikian, mengingat ilmu pengetahuan yang terus berkembang, diharapkan masukan dari semua pihak terhadap buku ini guna penyempurnaan ke depan.

Akhir kata kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung dalam penulisan buku ini.

Bandung, Desember 2013

Winarputro Adi Riyono

Penyusun

Daftar Isi

Puslitbang Jalan dan Jembatan.....	iii
Kata Pengantar	v
Daftar Isi.....	vi
Daftar Gambar	vii
Daftar Tabel.....	ix
Pendahuluan	11
Latar Belakang	13
Karakteristik FRP	15
Karakteristik material	17
Pengaruh pengusangan.....	30
Karakteristik sistem sambungan.....	34
Analisis dan Desain Sistem Sambungan Baut	47
Umum.....	49
Analisis kapasitas sambungan baut.....	51
Filosofi Perencanaan	57
Pendekatan perancangan	59
Ketentuan beban rencana.....	63
Angka keamanan.....	64

Properti mekanik minimum.....	65
Usulan filosofi perencanaan.....	65
Daftar Pustaka	74

Daftar Gambar

Gambar 1 Ukuran spesimen uji tarik FRP (dogbone).....	19
Gambar 2 Hasil uji tarik sampel dogbone FRP (t=7mm).....	19
Gambar 3 Uji lentur tiga titik FRP	20
Gambar 4 Ukuran spesimen uji kuat lentur FRP.....	20
Gambar 5 Hasil uji lentur spesimen FRP (t=7mm).....	21
Gambar 6 Uji tekan FRP dengan UTM 50 kN.....	21
Gambar 7 Hasil uji tekan sampel FRP.....	22
Gambar 8 Proses FTIR (sumber : Thermo Nicolet, 2001)	22
Gambar 9 FTIR Bruker Tensor 27	23
Gambar 10 Hasil uji FTIR sampel FRP	24
Gambar 11 Alat Furnace	25
Gambar 12 Alat uji kekerasan (ball indentation)	26
Gambar 13 Uji geser	26

Gambar 14 Uji Environmental Stress Cracking Resistance	27
Gambar 15 Image SEM pada berbagai pembesaran	29
Gambar 16 Pengusangan FRP dengan oven	30
Gambar 17 Pengusangan FRP dengan sinar UV	30
Gambar 18 Pengaruh pemanasan terhadap sebaran oksigen.....	31
Gambar 19 Pengaruh sinar UV terhadap sebaran oksigen	31
Gambar 20 Jenis moda kegagalan sambungan baut pada FRP (Hart-Smith, 1994).....	35
Gambar 21 Pengaruh rasio w/d terhadap moda kegagalan PFRP	38
Gambar 22 Pengaruh rasio e/d pada kekuatan sambungan PFRP (Park dkk, 2009).....	39
Gambar 23 Definisi e, w, dan d.....	39
Gambar 24 Variasi e/d yang akan diuji.....	40
Gambar 25 Pengujian sistem sambungan.....	40
Gambar 26 Moda kegagalan geser pada spesimen PFRP	41
Gambar 27 Hubungan Beban dan Stroke Kondisi 1D	42
Gambar 28 Hubungan Beban dan Stroke Kondisi 3D	43
Gambar 29 Hubungan Beban dan Stroke Kondisi 5D.....	43
Gambar 30 Pengaruh rasio e/d pada kekuatan sambungan PFRP	43
Gambar 31 Jarak baut minimum (Fiberline).....	44
Gambar 32 Pengaruh orientasi serat pada kekuatan sambungan (Rosner,1995).....	45
Gambar 33 Pengencangan baut dengan torsimeter	45

Gambar 34 Pengaruh torsi terhadap kekuatan sambungan PFRP	46
Gambar 35 Posisi ulir baut pada sambungan profil FRP	50
Gambar 36 Pola fraktur pada sambungan baut terhadap gaya yang searah sumbu pultrusi	51
Gambar 37 Pola fraktur pada sambungan baut terhadap gaya yang tegak lurus sumbu pultrusi	52
Gambar 38 Distribusi gaya pada laminasi di sekitar baut terhadap beban geser	53
Gambar 39 Sambungan baut tunggal dengan moda kegagalan tarik (net tension)	54
Gambar 40 Sambungan baut tunggal dengan moda kegagalan tarik belah (cleavage)	55
Gambar 41 Sambungan baut tunggal dengan moda kegagalan geser (shear out)	55
Gambar 42 Sambungan baut tunggal dengan moda kegagalan tumpu (bearing failure)	56
Gambar 43 Ketentuan perencanaan jembatan FRP (AASHTO)	63

Daftar Tabel

Tabel 1 Perbandingan kuat tarik bahan komposit dan logam	18
Tabel 2 Hasil uji ESCR pada PFRP $t=7\text{mm}$	28
Tabel 3 Kuat tarik setelah pengusangan dengan oven suhu $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (FRP $t=7\text{ mm}$)	32

Tabel 4 Kuat tarik setelah pengusangan dengan QUV.....32

Tabel 5 Kuat tekan setelah pengusangan dengan oven suhu 60 °C dan 100 °C (FRP t=7 mm).....33

Tabel 6 Kuat lentur setelah pengusangan dengan oven suhu 60 °C dan 100 °C (FRP t=7 mm)33

Tabel 7 Perbandingan geometri pada sistem sambungan baja dan FRP terhadap beban tarik..... 44

Tabel 8 Faktor reduksi62

Tabel 9 Faktor reduksi akibat pengaruh temperature (Fiberline).....63



1

Pendahuluan

1

Pendahuluan

Latar Belakang

Fiber Reinforced Polimer (FRP) merupakan material komposit yang hingga saat ini banyak digunakan sebagai komponen struktur pada elemen pesawat terbang, otomotif, perkuatan (retrofit), dan struktur lain termasuk jembatan. Aplikasi untuk jembatan bervariasi mulai dari penggunaan bahan FRP untuk elemen balok, pelat, kabel prategang, pagar pengaman, hingga sebagai bahan untuk perkuatan jembatan. Di Indonesia penggunaan bahan FRP masih terbatas untuk keperluan industri seperti tabung air, tangga, atap, dan gording. Penggunaan pada jembatan, baru banyak ditemui untuk keperluan perkuatan gelagar atau kolom. Biasanya bahan FRP yang digunakan berupa lembaran (*sheet*) yang langsung diaplikasikan pada elemen yang akan diperkuat dengan tambahan epoxy sebagai perekat.

Seiring dengan berkembangnya teknologi fabrikasi FRP, saat ini telah banyak diproduksi FRP dalam bentuk profil terpultrusi (*pultruded profile*). Bentuk profil dapat bervariasi mulai dari profil I, canal, tube, corrugated, dan lain-lain. Profil FRP dapat disambung dengan menggunakan bahan perekat (*epoxy*) atau dengan menggunakan sambungan mekanik seperti baut.

Dengan memanfaatkan teknologi FRP yang sebenarnya sudah banyak diproduksi di Indonesia maka dimungkinkan untuk penggunaan FRP sebagai elemen utama struktur jembatan. Namun demikian, FRP yang diproduksi di Indonesia perlu untuk dilihat kinerjanya dengan menggunakan serangkaian pengujian baik pengujian yang sifatnya fisik atau mekanik. Pada naskah ilmiah ini, disajikan beberapa karakteristik bahan FRP yang diproduksi di Indonesia. Dengan hasil uji tersebut diharapkan akan melengkapi database karakteristik bahan FRP yang ada di Indonesia.

Disamping aspek bahan, hal lain yang menjadi tantangan dalam perencanaan struktur berbahan dasar FRP adalah belum adanya code atau pedoman perancangan komposit yang baku di Indonesia atau bahkan di dunia. Hal ini dikarenakan variasi tipe serat, arsitektur serat, matriks yang digunakan, kombinasi resin dan serat yang cukup besar sehingga sulit untuk dibuat code yang berlaku universal. Berbeda dengan bahan lain seperti baja atau beton yang memiliki variasi properties yang tidak terlalu besar, maka untuk FRP dengan perbedaan komposisi material akan memberikan perbedaan parameter desain. ■

2

Karakteristik FRP

2

Karakteristik FRP

Karakteristik material

Secara umum, FRP memiliki sifat yang anisotropy artinya memiliki properti material yang berbeda di tiap arah sumbu. Hal ini juga dipengaruhi oleh komposisi kandungan yang ada di dalam FRP. Sifat anisotropy akan berpengaruh pada proses desain elemen ataupun sistem sambungan FRP. Disamping sifat anisotropy beberapa karakteristik lain seperti kuat tarik, identifikasi material (FTIR), hardness, modulus elastisitas, kuat geser, dan ketahanan terhadap lingkungan, dll.

Kuat tarik

Salah satu kelebihan FRP yaitu memiliki kuat tarik yang tinggi yaitu berkisar 20% hingga 100% bahan logam atau bahkan lebih, sesuai dengan jenis dan kadar serat yang

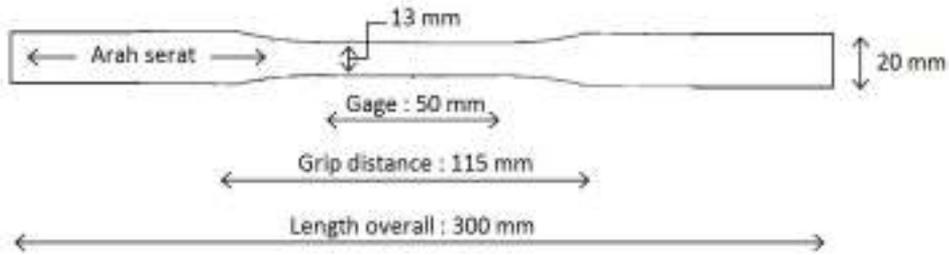
digunakan. **Tabel 1** memperlihatkan perbandingan kuat tarik beberapa jenis FRP baik yang thermoset ataupun thermoplastic serta baja. Terlihat bahwa FRP memiliki variasi kuat tarik yang cukup besar, karena hal ini bergantung pada kebutuhan material FRP disamping komposisi bahan penyusunnya. Sebagai contoh untuk FRP jenis thermoset, nilai kuat tarik mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan kadar serat pada FRP.

Tabel 1 Perbandingan kuat tarik bahan komposit dan logam

No.	Properti	fiber glass	Tensile strength	
	Unit	%	10 ³ psi	Mpa
	Metode Uji	D790	D638	
A. Fiber Reinforced Thermoset				
1.	Polyester (Pultrusi)	22	30	206.85
2.	Polyester (woven roving)	50	37	255.115
3.	Epoxy (filament winding)	80	80	551.6
B. Fiber Reinforced Thermoplastic				
1.	Polypropylene	20	6.5	44.8175
2.	Nylon 6	30	23	158.585
3.	Polycarbonate	10	12	82.74
C. Metal				
1.	ASTM A-606 HSLA cold rolled steel	-	65	448.175
2.	AISI 304 stainless steel	-	80	551.6
3.	2036-T4 wrought aluminium	-	49	337.855

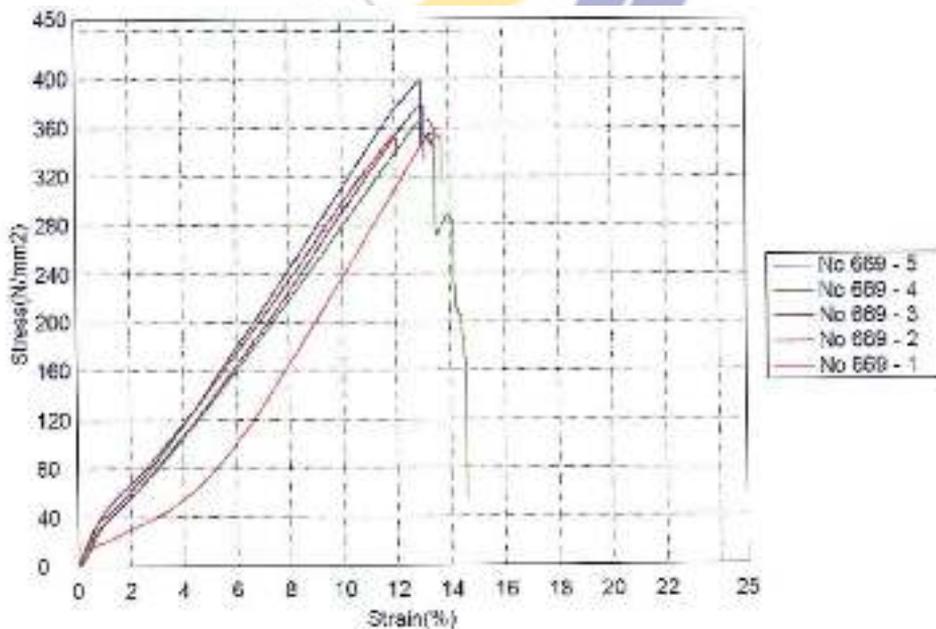
(Sumber : MFGC;2003)

Untuk mengetahui kuat tarik bahan FRP, dapat dilakukan dengan pengujian tarik dengan menggunakan sampel *dogbone*. Ukuran sampel untuk uji tarik harus sesuai dengan persyaratan ASTM D638. Pada naskah ini, disajikan hasil uji kuat tarik FRP yang diproduksi di Indonesia oleh PT. Intec Persada. Spesimen berupa spesimen *dogbone* dengan panjang 30 cm dan lebar 2 cm (**Gambar 1**).



Gambar 1 Ukuran spesimen uji tarik FRP (dogbone)

Hasil uji tarik dapat dilihat pada **Gambar 2**. Berdasarkan **Gambar 2** dapat diperlihatkan FRP berperilaku elastik sebelum akhirnya mengalami kegagalan. Kuat tarik rata-rata FRP yaitu sebesar 370,4 MPa dengan standar deviasi 18,35 MPa. Kemudian regangan maksimum diperoleh sebesar 13,02% dengan standar deviasi 0,64%.



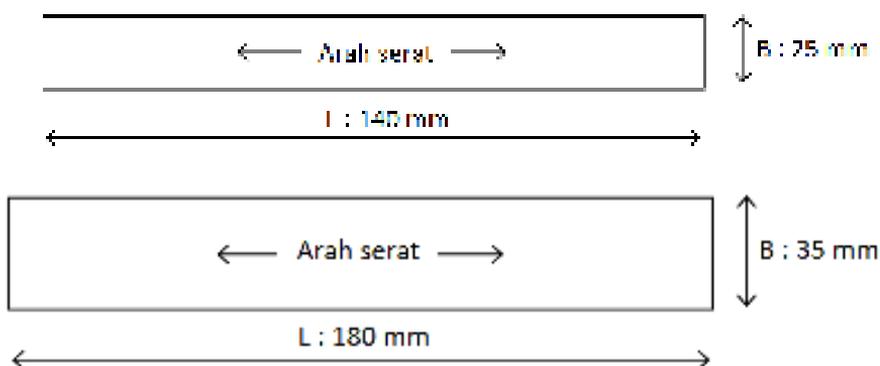
Gambar 2 Hasil uji tarik sampel dogbone FRP ($t=7\text{mm}$)



Gambar 3 Uji lentur tiga titik FRP

Kuat lentur

Pengujian kuat lentur dilakukan berdasarkan ASTM D-790, menggunakan alat UTM berkapasitas maksimum 50 kN (**Gambar 3**) dengan kecepatan pembebanan 2,9 mm/menit pada temperatur 23,6 - 23,7°C dan kelembaban relatif 50%. Pengujian kuat lentur dilakukan dengan konsep *three point bending* yang mana spesimen diberi beban terpusat pada bagian tengah secara bertahap hingga runtuh (**Gambar 3**). Pengujian dilakukan pada minimal 5 spesimen uji dengan bentuk dan ukuran seperti pada **Gambar 4**.



Gambar 4 Ukuran spesimen uji kuat lentur FRP



Gambar 5 Hasil uji lentur spesimen FRP ($t=7\text{mm}$)

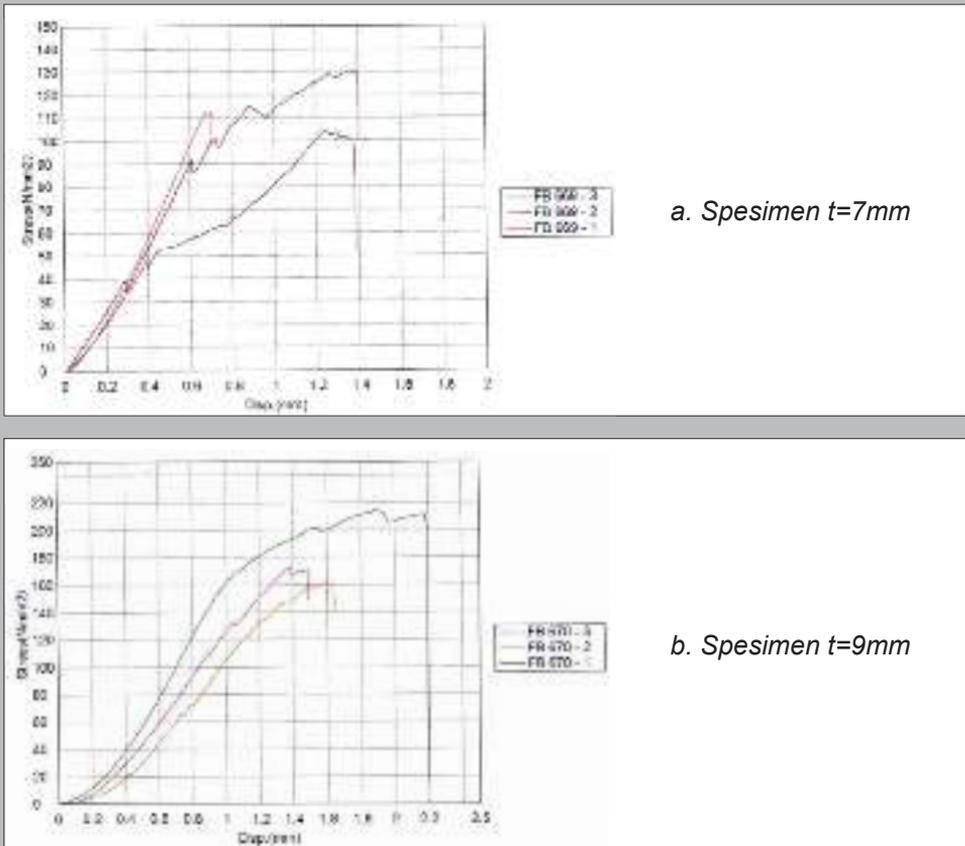
Hasil uji tarik menunjukkan kuat lentur rata-rata FRP dengan ketebalan 7 mm dan 9 mm masing-masing yaitu sebesar $498 \pm 42,09$ MPa dan $501,2 \pm 15,06$ MPa. Hasil uji untuk spesimen FRP dengan ketebalan 7 mm dapat dilihat pada **Gambar 5**.

Kuat tekan

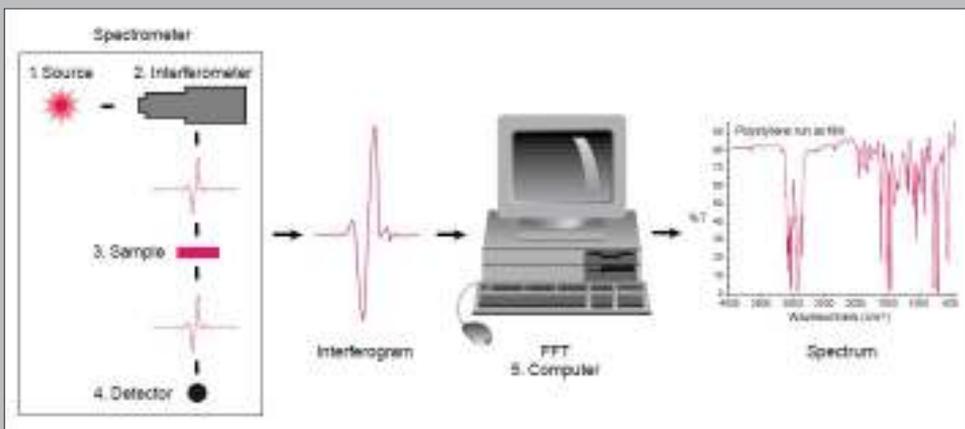
Pengujian kuat tekan komposit polimer dilakukan untuk mengetahui kuat tekan FRP. Pengujian dilakukan dengan cara menekan spesimen FRP dengan bantuan UTM kapasitas 50 kN (**Gambar 6**). Spesimen diberi tekanan pada arah sejajar dengan arah serat utama FRP.



Gambar 6 Uji tekan FRP dengan UTM 50 kN



Gambar 7 Hasil uji tekan sampel FRP



Gambar 8 Proses FTIR (sumber : Thermo Nicolet, 2001)

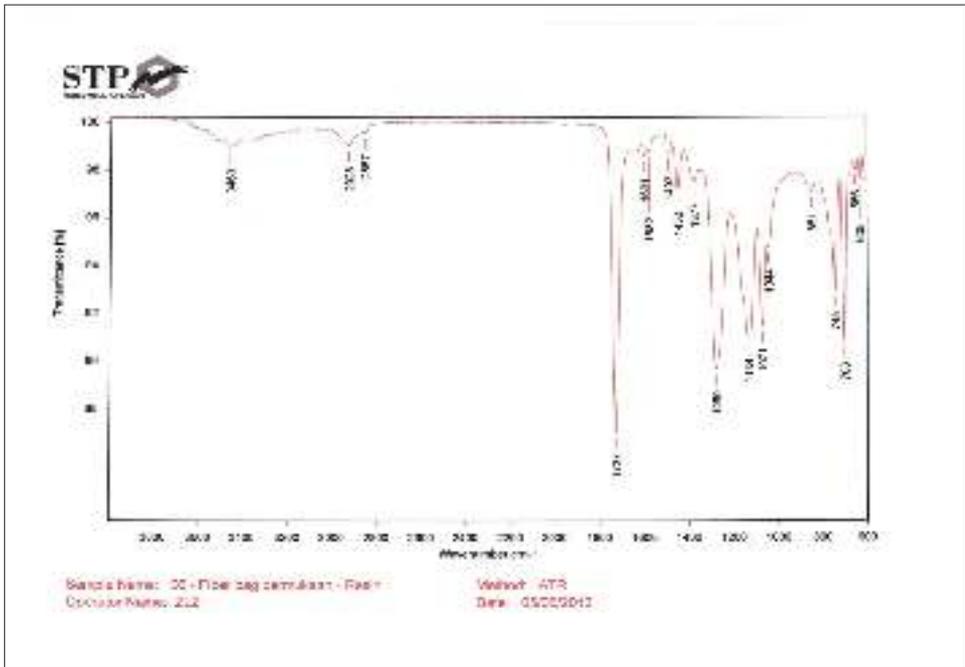
Hasil uji kuat tekan menunjukkan kuat tekan rata-rata FRP dengan ketebalan 7 mm dan 9 mm masing-masing yaitu sebesar $162,29 \pm 45,24$ MPa dan $223,35 \pm 76,64$ MPa. Hasil uji dalam bentuk grafis dapat dilihat pada **Gambar 7**.

Karakterisasi jenis resin

Fourier Transform Infra Red (FTIR) merupakan salah satu pengujian laboratorium yang digunakan untuk mengetahui jenis bahan resin yang digunakan pada komposit. FTIR dilakukan dengan menggunakan bantuan sinyal yang dikenal dengan "interferogram". Secara umum metode kerjanya yaitu preparasi spesimen FRP komposit dengan didegradasi tanpa oksigen, cairan jernih terbentuk, dioleskan pada permukaan KBr pele sebelum diuji dengan FTIR. Kemudian bahan spesimen dikenakan sinar IR, kemudian dimonitor spektrum yg dihasilkan karena absorpsi oleh gugus kimia dalam bahan. Setiap gugus kimia memberikan respon spesifik pada panjang gelombang tertentu (**Gambar 8**). Identifikasi dengan infra red (FTIR) dilakukan dengan menggunakan standar ASTM E 1252.



Gambar 9 FTIR Bruker Tensor 27



Gambar 10 Hasil uji FTIR sampel FRP

Dengan menggunakan sampel PFRP dari produk *fiberbeam* yang diproduksi salah satu pabrik di Indonesia diperoleh spektrum *fourier* seperti pada **Gambar 10**. Dengan mengidentifikasi puncak-puncak gelombang pada grafik tersebut, resin yang digunakan memiliki golongan *alkyd based on phthalic anhydride*.

Sedangkan sampel hasil uji kandungan serat diidentifikasi sebagai material campuran CaCO_3 dan *polysilicate* dengan *peak-peak* spesifik sebagai berikut:

CaCO_3 : 1408, 875, 712 cm^{-1}

Polysilicate: 952 dan 690 cm^{-1}

Kandungan serat

Kandungan serat bahan komposit sangat bervariasi sesuai dengan kebutuhan yang diharapkan. Umumnya perbandingan serat terhadap resin bahan komposit 50 : 50. Untuk mengetahui kadar serat pada komposit FRP, dapat dilakukan dengan bantuan alat furnace. Secara umum metode kerjanya yaitu penyiapan komposit untuk ditimbang. Kemudian spesimen dibakar pada furnace (**Gambar 11**). Setelah dibakar kemudian ditimbang lagi untuk diketahui massa yg hilang sebagai resin.



Gambar 11 Alat Furnace

Pengujian kandungan serat dilakukan untuk mengetahui persentase serat dan resin pada profil komposit. Alat yang digunakan meliputi *furnace*, cawan porselin, timbangan analitik, dan desikator. Prosedurnya yaitu dengan preparasi spesimen dan penimbangan sebelum dibakar. Kemudian spesimen dibakar dan ditimbang lagi untuk kemudian dihitung perbedaan berat sebelum dan setelah dibakar. Persentase *filler* dapat dihitung dengan menggunakan formula sebagai berikut :

$$filler(\%) = \frac{(M_2 - M_3) \times 100}{(M_2 - M_1)}$$

Dimana,

M_1 : berat cawan kosong

M_2 : berat spesimen + cawan

M_3 : berat spesimen + cawan setelah pembakaran

Setelah dilakukan uji kandungan serat, diperoleh hasil bahwa komposisi serat masing-masing untuk ketebalan 7 mm dan 9 mm berada pada kisaran 63% sehingga resin memiliki prosentase di kisaran 37%. Prosentasi ini memberikan pengaruh pada kekuatan tarik dalam arah serat, namun disisi lain berpengaruh pada potensi delaminasi.

Hardness (Ball Indentation)

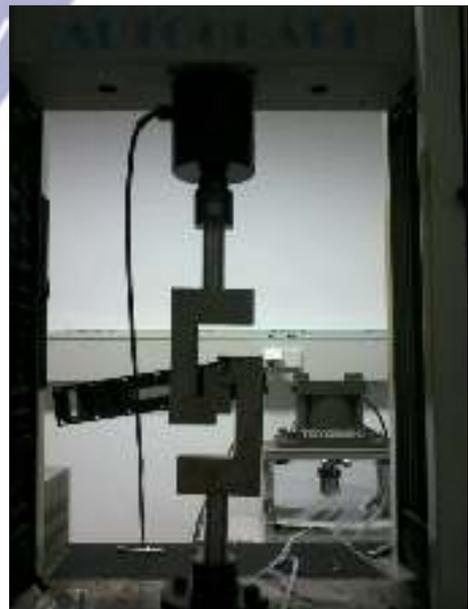
Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui kekerasan PFRP. Pengujian dilakukan dengan cara meletakkan spesimen pada pegangan alat uji (**Gambar 12**) dan dikencangkan. Kemudian, dikenai beban permulaan yaitu 98 N. Setelah itu indentor dipasang kemudian diset pada posisi nol, dan dipenetrasi indentornya. Setelah 30 detik, nilai yang terbaca dijadikan sebagai pembacaan dan ditingkatkan ke muatan khusus sampai 30 detik. Hasil uji kekerasan PFRP menunjukkan kekerasan PFRP dengan ketebalan 7 mm dan 9 mm masing-masing yaitu sebesar $240 \pm 36,79$ MPa dan $309 \pm 38,14$ MPa.

Kuat geser

Karakteristik kuat geser dapat diperoleh dengan uji geser FRP. Sebanyak lima potongan spesimen diuji menggunakan UTM dengan kecepatan 1,5 mm/menit pada temperatur 22,6 °C dan kelembapan relatif 55% (**Gambar 13**). Spesimen dibentuk menyerupai huruf S. Pengujian geser



Gambar 12 Alat uji kekerasan
(ball indentation)



Gambar 13 Uji geser

dilakukan hingga spesimen mengalami kegagalan. Kuat geser diperoleh dengan membagi beban saat spesimen mengalami kegagalan terhadap luas gesernya. Setelah dilakukan pengujian diperoleh kuat geser sebesar $40,26 \pm 7,74$ MPa dengan nilai regangan yaitu sebesar $4,63 \pm 1,13$ MPa.

Ketahanan terhadap lingkungan (ESCR)

Pengujian ESCR dilakukan untuk melihat perilaku FRP pada saat dibebani dalam keadaan terkena fluida. Pengujian ESCR dilakukan dengan modifikasi ASTM D1693, dimana dipilih larutan Igepal 10% dan air sebagai bahan kimia ESCR. Spesimen yang digunakan yaitu sampel *dogbone* dilengkungkan pada panjang 8 cm dan lendutan antara 2-5 mm. Kemudian bahan kimia diteteskan pada permukaan terdeformasi hingga membasahi sampel. Pengamatan dilakukan setiap menit selama selang waktu 30 menit.



Gambar 14 Uji Environmental Stress Cracking Resistance

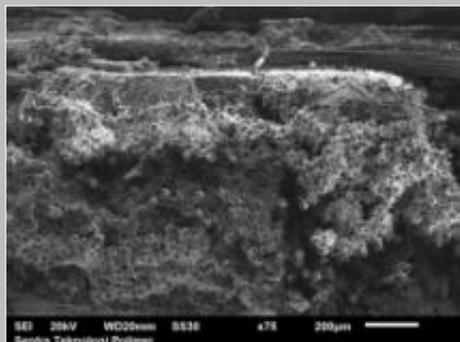
Hasil uji ESCR dapat dilihat pada **Tabel 2**, terlihat bahwa pada kondisi deformasi yang sama (± 4 mm), air memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap delaminasi PFRP.

Tabel 2 Hasil uji ESCR pada PFRP $t=7$ mm

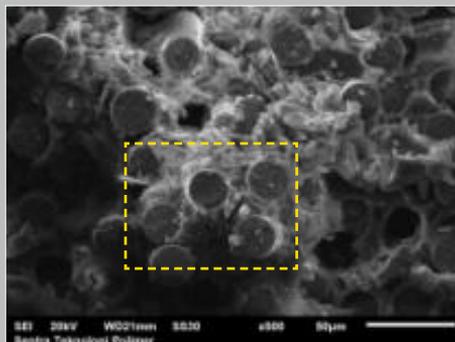
No	Lendutan (mm)	Fluida	Waktu (menit)	Identifikasi
1	5	Igepal 10%	7	Delaminasi
2	4	Igepal 10%	15	Delaminasi, dilanjutkan hingga 24 jam tidak tampak perubahan lain
3	3	Igepal 10%	25	Delaminasi, dilanjutkan hingga 24 jam tidak tampak perubahan lain
4	4	Air	8	Delaminasi bunyi crack, dilanjutkan 0.5 jam, tanpa perubahan.
5	4	Air	15	Delaminasi bunyi crack, dilanjutkan 2 jam, tanpa perubahan.
6	4	Air	19	Delaminasi, selama 1,5 jam tanpa perubahan.
7	4	Air	21	Melengkung, delaminasi? selama 1,5 jam

Scanning Electron Microscopes (SEM)

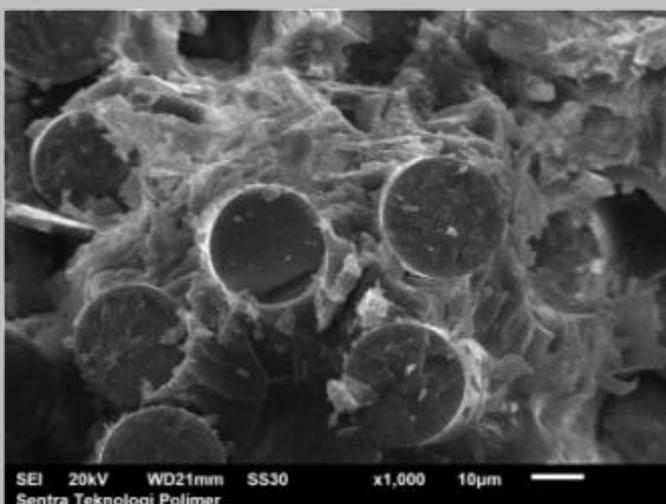
Pengamatan untuk mengetahui kondisi ikatan antara serat dan resin dapat dilakukan dengan bantuan uji SEM. Pengujian dilakukan dengan alat SEM. Analisis dilakukan pada *accelerated voltage* sebesar 30 kV sebanyak 3 kali pada tempat yang berbeda. Berdasarkan hasil pengamatan SEM (**Gambar 15**), diperoleh bahwa karakterisasi morfologi pada sampel sebelum pengusangan menunjukkan ikatan yang baik antara matriks polimer dengan serat.



a. 75x



b. 500x



c. 1000x

Gambar 15 Image SEM pada berbagai pembesaran

Pengaruh pengusangan

Seperti diketahui, pada aplikasi FRP untuk jembatan maka elemen FRP akan terekspos terhadap lingkungan luar. Pengaruh lingkungan luar dapat berarti korosi, temperatur, kelembapan, dan lain-lain. Untuk mensimulasi pengaruh lingkungan luar dalam hal ini adalah temperatur, dapat dilakukan dengan bantuan oven (**Gambar 16**) dengan suhu 60° dan 100° selama selang waktu tertentu (500 jam, 1000 jam, dan 1500 jam).

Simulasi selanjutnya yaitu dengan menggunakan sinar ultraviolet dengan menggunakan bantuan alat QUV (**Gambar 17**). Pengujian dilakukan dengan memaparkan spesimen FRP terhadap sinar UV selama 500 jam, 1000 jam, hingga 1900 jam dengan kondisi sebagai berikut :

Radiasi UV : menerus
Temperatur : 50° dan 60° , masing-masing 4 jam
Tipe lampu : UVA - 340 nm
Durasi : 1900 jam

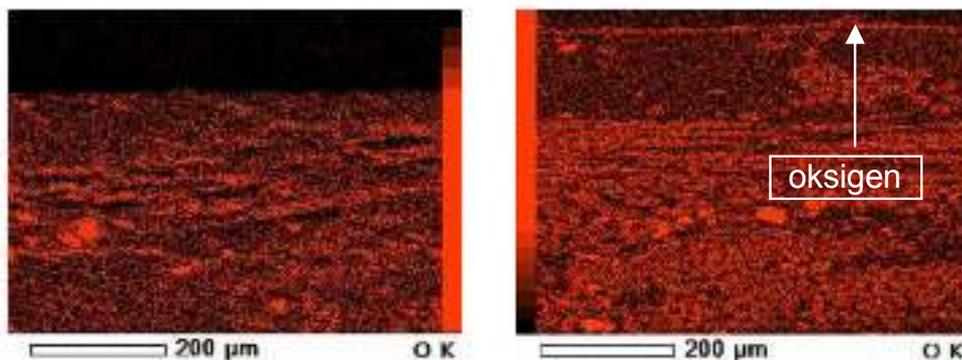
Setelah dilakukan pengujian, akan dilihat pengaruh pengusangan terhadap karakteristik FRP seperti misalnya kadar oksigen (oksidasi), kuat tarik, kuat tekan, kekerasan (hardness), dan kuat lenturnya.



Gambar 16 Pengusangan FRP dengan oven



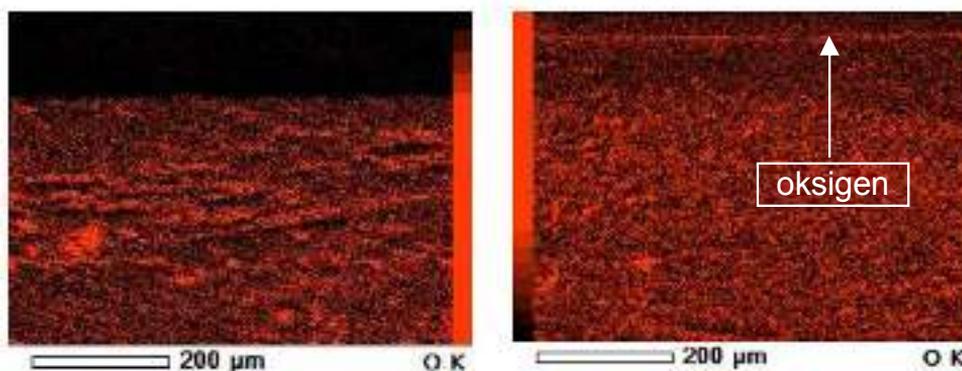
Gambar 17 Pengusangan FRP dengan sinar UV



a. Sebaran oksigen sampel sebelum pengusangan

b. Sebaran oksigen setelah pemanasan dengan oven pada 100°C selama 1500 jam

Gambar 18 Pengaruh pemanasan terhadap sebaran oksigen



a. Sebaran oksigen sampel sebelum pengusangan

b. Sebaran oksigen setelah terpapar sinar UV A selama 1900 jam

Gambar 19 Pengaruh sinar UV terhadap sebaran oksigen

a. Kadar oksigen

Pengaruh pemanasan dengan menggunakan oven memperlihatkan bahwa terjadi penetrasi oksidasi yang relatif kecil sehingga dapat dikatakan pada pemanasan dengan oven suhu 100°C selama 1500 tidak memberikan pengaruh yang signifikan pada laju oksidasi.

Hal yang sama juga terjadi untuk pemanasan dengan menggunakan sinar UV A selama 1900, laju penetrasi oksidasi sangat kecil sehingga dapat dikatakan pengaruh oksigen relatif kecil.

b. Kuat tarik

Pengusangan dengan menggunakan oven pada suhu 60 °C dan 100 °C memberikan pengaruh yang bervariasi pada spesimen FRP (**Tabel 3**). Pengaruh pemanasan suhu 500 °C memberikan peningkatan kuat tarik 50%, hal ini kemungkinan akibat belum selesainya proses *crosslinking* pada proses produksi PFRP. Kekuatan mekanik dapat meningkat akibat proses *crosslinking*, tetapi dapat juga menurun akibat delaminasi seperti misalnya pada saat pengusangan selama 1000 jam.

Tabel 3 Kuat tarik setelah pengusangan dengan oven suhu 60 °C dan 100 °C (FRP $t=7$ mm)

No.	Kondisi pengusangan	Kuat tarik (MPa)	
		Setelah pengusangan suhu 60 °C	Setelah pengusangan suhu 100 °C
1	Sebelum pengusangan	272,03 ± 14,66	272,03 ± 14,66
2	500 jam	397,00 ± 76,14	429,27 ± 22,19
3	1000 jam	258,07 ± 46,47	187,93 ± 14,34
4	1500 jam	275,57 ± 19,42	275,66 ± 12,89

Pengaruh pengusangan dengan menggunakan sinar UV A terhadap kuat tarik dapat dilihat pada **Tabel 4**. Berdasarkan **Tabel 4** dapat diperlihatkan bahwa sinar UV cenderung memberikan penurunan kekuatan tarik FRP.

Tabel 4 Kuat tarik setelah pengusangan dengan QUV

No.	Kondisi pengusangan	Kuat tarik (MPa)
1	Sebelum pengusangan	272,03 ± 14,66
2	498 jam	273,70 ± 15,40
3	1054 jam	218,94 ± 8,52
4	1500 jam	192,16 ± 18,40

c. Kuat tekan

Selain dilakukan pengujian tarik, juga dilakukan uji tekan spesimen setelah pengusangan dengan hasil seperti pada **Tabel 5**. Berdasarkan

Tabel 5 dapat diperlihatkan bahwa spesimen FRP cenderung mengalami peningkatan kuat tekan setelah pengusangan spesimen. Hal ini dimungkinkan karena proses pengerasan resin saat pemanasan pada suhu pengusangan (60 °C dan 100 °C).

Tabel 5 Kuat tekan setelah pengusangan dengan oven suhu 60 °C dan 100 °C (FRP $t=7$ mm)

No.	Kondisi pengusangan	Kuat tekan (MPa)	
		Setelah pengusangan suhu 60 °C	Setelah pengusangan suhu 100 °C
1	Sebelum pengusangan	162,29 ± 45,24	162,29 ± 45,24
2	500 jam	183,92 ± 12,64	176,47 ± 18,19
3	1000 jam	207,81 ± 48,83	138,63 ± 27,20
4	1500 jam	188,36 ± 52,48	148,60 ± 18,42

d. Kuat lentur

Pengaruh pemanasan terhadap kuat lentur dapat dilihat pada **Tabel 6**. Terlihat bahwa pemanasan pada suhu 60 °C dan 100 °C tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kuat lentur PFRP.

Tabel 6 Kuat lentur setelah pengusangan dengan oven suhu 60 °C dan 100 °C (FRP $t=7$ mm)

No.	Kondisi pengusangan	Kuat lentur (MPa)	
		Setelah pengusangan suhu 60 °C	Setelah pengusangan suhu 100 °C
1	Sebelum pengusangan	470,41 ± 41,09	470,41 ± 41,09
2	500 jam	517,83 ± 16,50	-
3	1000 jam	469,46 ± 43,71	409,82 ± 58,61
4	1500 jam	490,35 ± 18,95	459,81 ± 27,97

Karakteristik sistem sambungan

Secara umum terdapat 3 jenis sambungan pada profil frp yaitu

- Sambungan baut
- Sambungan dengan perekat (adhesives)
- Sambungan kombinasi (baut dan perekat)

Sambungan baut banyak digunakan pada aplikasi bangunan teknik sipil khususnya rangka. Sedangkan sambungan adhesive jarang digunakan untuk bangunan sipil oleh karena rentan terhadap kegagalan katastrofik tanpa adanya peringatan. Jika ingin memperoleh tingkat kekangan yang baik, maka dapat digunakan sambungan kombinasi dengan menggunakan baut dan perekat. Sambungan kombinasi akan meminimalkan konsentrasi tegangan pada bagian lubang baut dengan memberikan distribusi tegangan yang lebih baik di antara elemen yang disambung. Kelebihan lainnya yaitu dengan adanya clamping force yang diberikan oleh baut atau sistem washer maka dapat membantu proses perawatan perekat selama proses ereksi. Hasil penelitian oleh Mossalam (1993) menunjukkan bahwa dengan menggunakan sambungan kombinasi dapat meningkatkan daktilitas. Namun demikian, tentunya terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi kinerja sambungan yaitu : tipe perekat yang digunakan, persiapan permukaan, proses perawatan, tingkat kekencangan, jarak baut ke tepi, dan rasio geometri elemen yang disambungkan.

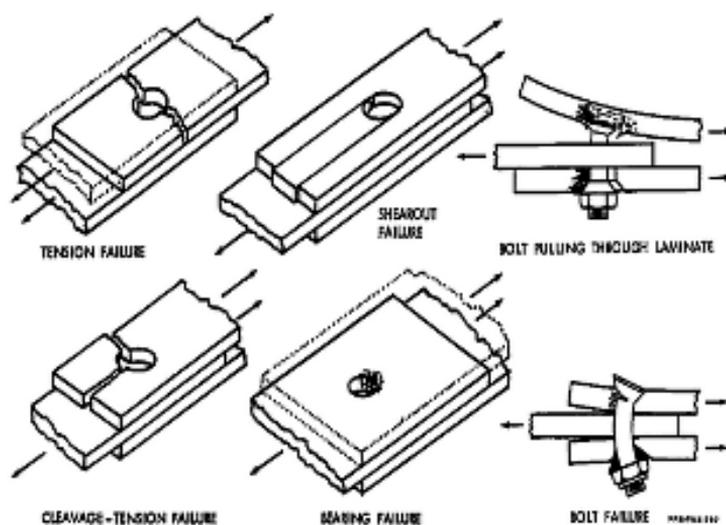
Perilaku mekanik sambungan baut

Umum

Penelitian terhadap penggunaan baut untuk sambungan komposit polimer diawali pada industri pesawat terbang di Amerika di pada pertengahan tahun 1960. Berdasarkan pada banyak kajian yang dilakukan oleh industry dan universitas, termasuk kajian anisotropy dan perilaku getas komposit polimer, sebuah teknologi logam dan komposit dirancang

spesifik untuk struktur komposit. Sambungan tersebut bukan merupakan sistem sambungan dengan baut logam yang umum digunakan untuk menyambungkan profil FRP. Sambungan mekanikal ini memiliki bidang kontak yang besar untuk efisiensi sistem sambungan. Disamping itu, studi durabilitas dan kompatibilitas menunjukkan bahwa penggunaan baut dengan bahan aluminium perlu dihindari karena sensitivitas FRP terhadap korosi galvanis. Korosi galvanis muncul saat logam berhubungan langsung dengan komposit karbon, yang mengakibatkan korosi pada matriks komposit.

Moda kegagalan yang umum pada profil FRP



Gambar 20 Jenis moda kegagalan sambungan baut pada FRP (Hart-Smith, 1994)

Moda pembebanan yang perlu diperhatikan pada sambungan profil komposit yaitu pembebanan tarik (*tensile*) dibandingkan pembebanan tekan (*compression*). Hal ini disebabkan sambungan yang menerima beban tekan kurang sensitif terhadap pengaruh geometri (seperti jarak lubang baut ke tepi, lebar profil, dan ketebalan profil) dan secara umum lebih kuat dibandingkan sambungan yang menerima beban tarik.

Secara umum terdapat 7 moda kegagalan profil komposit yang disambung dengan baut terhadap gaya tarik yaitu sebagai berikut :

1. Kegagalan tumpuan
2. Kegagalan geser
3. Kegagalan tarik
4. Kombinasi kegagalan geser dan tarik
5. Kegagalan pada baut
6. Kegagalan tusuk (punching)
7. Kombinasi kegagalan di atas

Faktor yang mempengaruhi kekuatan sambungan

Meskipun perilakunya yang anisotropy dan kurangnya daktilitas PFRP, sambungan baut pada komposit gagal dengan perilaku yang sejenis dengan sambungan logam. Namun, oleh karena pada komposit tidak mengalami leleh, mekanisme kegagalan komposit dan logam sangat berbeda satu sama lain (Kretsis dan Matthews 1985; ASTM 2002).

Beberapa faktor yang mempengaruhi moda kegagalan PFRP yaitu sebagai berikut :

- Faktor geometrik : lebar, jarak tepi, ketebalan, diameter lubang, dll.
- Faktor material : tipe serat dan resin yang digunakan, kandungan filler, dan fraksi volume, perlakuan permukaan serat, dll.
- Faktor baut : tipe baut, ukuran pengunci, ukuran lubang dan toleransi, serta torsi.
- Faktor perencanaan : tipe sambungan, arah pembebanan, laju pembebanan, beban statik dan dinamik.

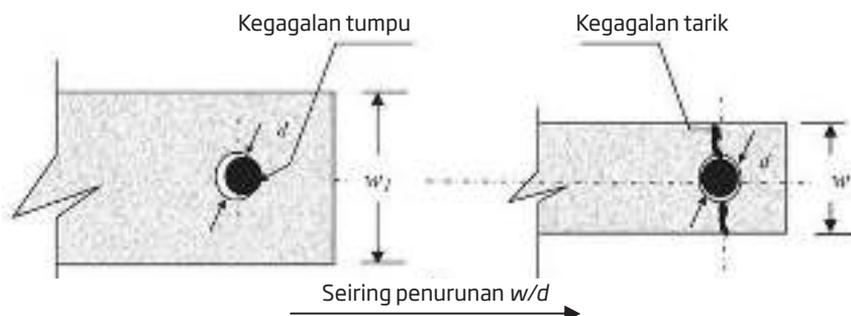
- Faktor lingkungan dan jangka panjang : rangkai, kelembapan, perubahan suhu, serangan kimia, korosi, dsb.

Pengaruh ketebalan

Pengaruh ketebalan elemen (t) biasanya diekspresikan dalam bentuk rasio diameter lubang terhadap tebal (d/t). Secara umum, rasio d/t harus lebih besar dari 1 (satu) untuk meminimalkan kegagalan baut. Untuk komposit dengan modulus elastisitas yang tinggi seperti karbon/epoxy, pengaruh d/t hampir tidak ada untuk kondisi tekanan lateral yang tinggi (Collings, 1997). Namun rasio d/t lebih besar dari 3 (tiga) akan mempengaruhi sambungan baut yang terbuat dari komposit bermodulus rendah (misalnya PFRP E-Glass/polyester atau E-Glass/vinylester) (Kretsis dan Matthews 1985). Kuat tumpu ultimit sambungan meningkat dengan turunnya nilai d/t . Berdasarkan hal ini, maka perencana dapat mencoba menggunakan nilai d/t yang kecil, dengan catatan batas bawahnya yaitu pada kondisi baut akan gagal geser (misalnya dengan memperkecil diameter baut terhadap ketebalan, sehingga kegagalan akan cenderung dialami oleh baut). Batas terendah d/t tergantung dari mutu dan tipe baut, namun secara umum direkomendasikan untuk tidak menggunakan d/t lebih rendah dari 1,2.

Pengaruh lebar profil

Kegagalan tumpu timbul pada sambungan komposit dengan rasio diameter lubang terhadap lebar sambungan (d/w) yang rendah. Semakin kecil lebar profil yang disambung, maka terdapat peralihan kegagalan dari kegagalan tumpu ke gagal tarik (komposit mengalami kegagalan sepanjang lebar bagian penampang, dengan retak berawal dari lubang baut) seperti tergambar pada **Gambar 21**. Perubahan moda kegagalan dari tumpu ke tarik seiring w/d berkurang menghasilkan kekuatan sambungan mengalami penurunan. Sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Kretsis dan Matthews (1985) menunjukkan tidak terdapat batas yang jelas proses transisi dari moda kegagalan satu ke moda kegagalan lainnya.



Gambar 21 Pengaruh rasio w/d terhadap moda kegagalan PFRP

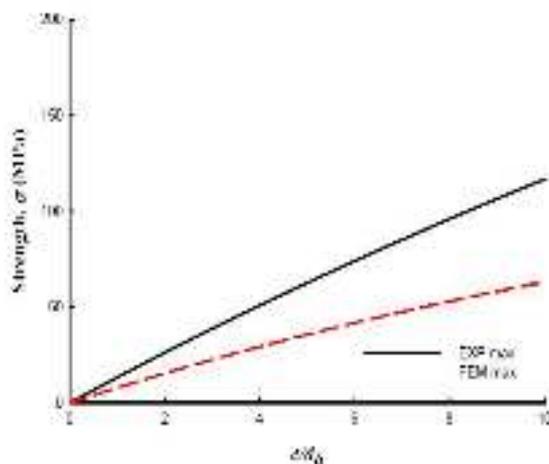
Oleh karena itu lebih mudah untuk mendefinisikan daerah transisi dibandingkan titik transisi. Daerah transisi dapat diidentifikasi dengan memperpanjang setengah w/d pada tiap sisi titik transisi.

Pengaruh jarak ke tepi

Jarak e didefinisikan sebagai jarak dari lubang baut ke tepi sambungan FRP. Jarak ini memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan sambungan PFRP. Pengaruhnya biasanya diekspresikan dalam bentuk rasio jarak lubang baut ke tepi terhadap diameter lubang baut (e/d). Seiring dengan nilai e/d yang berkurang maka terjadi peralihan dari kegagalan tumpu ke kegagalan geser (*shear out mode*) tergantung susunan serat laminasi. Perlu diperhatikan bahwa kegagalan geser diakibatkan karena susunan serat, bukan karena pendeknya jarak lubang ke tepi PFRP. Sehingga dalam perencanaan sambungan, engineer jangan hanya berpedoman untuk meningkatkan rasio e/d saja.

Salah satu hasil penelitian yang memperlihatkan pengaruh rasio e/d terhadap kekuatan sambungan yaitu penelitian yang dilakukan oleh Park dkk, 2009. Hasil penelitian beliau baik eksperimental dan simulasi numeric memperlihatkan bahwa rasio e/d memberikan peningkatan secara linier terhadap kekuatan sambungan (**Gambar 22**).

Disamping berdasarkan kajian pustaka, penulis juga mencoba melakukan pengujian sistem sambungan dengan baut tunggal dan dengan variasi

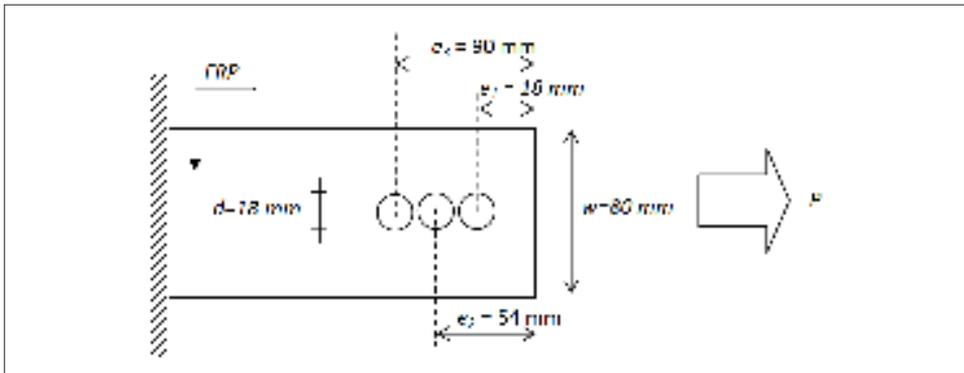


Gambar 22 Pengaruh rasio e/d pada kekuatan sambungan PFRP (Park dkk, 2009)

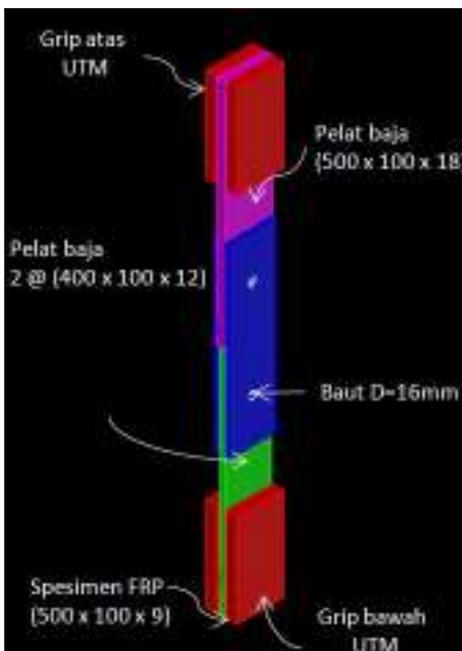


Gambar 23 Definisi e , w , dan d

e/d serta menggunakan spesimen PRFP yang diproduksi di Indonesia. Pengujian sistem sambungan dilakukan untuk melihat performa PFRP terhadap beban tarik. Pengujian dilakukan dengan bantuan alat uji tarik (UTM) di Laboratorium Balai Jembatan dan Bangunan Pelengkap Jalan, Puslitbang Jalan dan Jembatan. Salah satu performa yang akan dilihat yaitu pengaruh jarak baut ke tepi dan pengaruh torsi terhadap beban maksimum sistem sambungan. Definisi geometri sistem sambungan dapat dilihat pada **Gambar 23**. e adalah jarak dari pusat lubang baut ke tepi PFRP, w adalah lebar PFRP, dan d adalah diameter lubang baut.



Gambar 24 Variasi e/d yang akan diuji



a. elemen sistem sambungan



b. Uji tarik dengan UTM



c. spesimen sistem sambungan

Gambar 25 Pengujian sistem sambungan

Jarak lubang baut ke tepi dibuat menjadi 3 variasi yaitu $1d$, $3d$, dan $5d$ dengan d sebesar 18 mm. Sehingga bila dibuat sket variasi jarak lubang baut ke tepi dapat diperlihatkan seperti pada **Gambar 24**. Masing-masing variasi akan diuji 3 kali sehingga diperoleh 3 data uji.

Pengujian dilakukan dengan menggunakan bantuan pelat baja sebagai elemen penyambung dengan model dimensi elemen seperti tergambar pada **Gambar 25a**. Setelah masing pelat dirakit dan diberi baut maka diperoleh spesimen uji seperti pada **Gambar 25c**. Spesimen ini akan diuji dengan UTM seperti pada **Gambar 25b**.

Setelah dilakukan pengujian tarik pada sambungan, diperoleh hasil bahwa seluruh spesimen mengalami kegagalan geser (shear out failure) seperti diperlihatkan pada **Gambar 26**. Hal ini mengindikasikan kurangnya serat yang berorientasi 45° atau 90° yang memberikan tahanan geser pada sambungan.



a. spesimen sebelum diuji (5d)



b. kegagalan geser (1d)

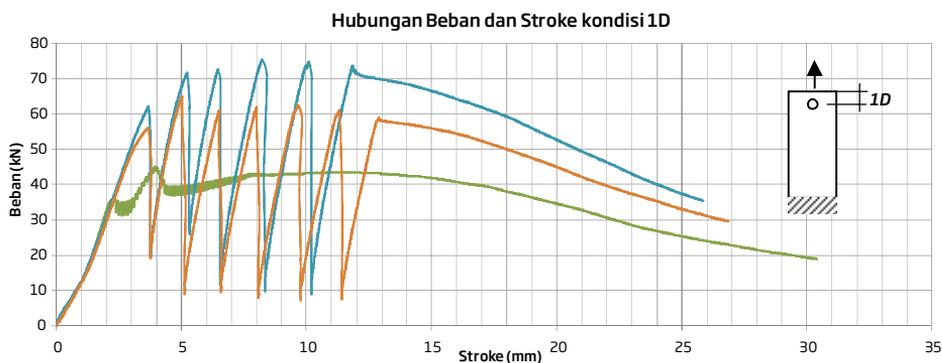


b. kegagalan geser (3d)



b. kegagalan geser (5d)

Gambar 26 Moda kegagalan geser pada spesimen PFRP



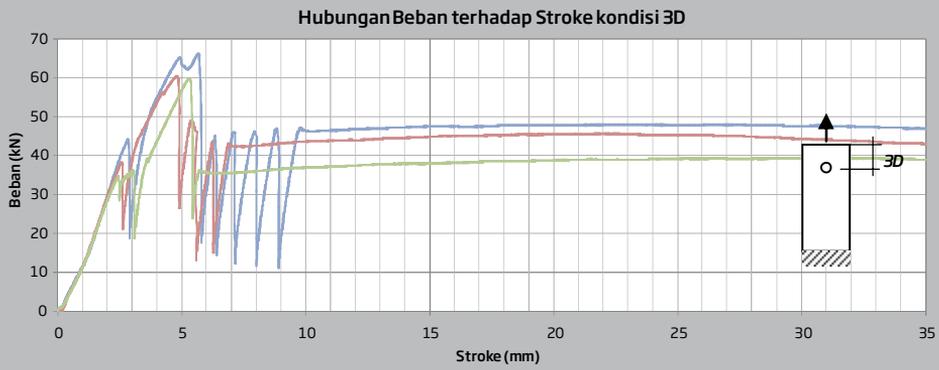
Gambar 27 Hubungan Beban dan Stroke Kondisi 1D

Pengaruh jarak lubang baut ke tepi dapat diperlihatkan dalam bentuk hubungan beban terhadap *stroke* mulai dari **Gambar 27** sampai dengan **Gambar 29**. **Gambar 27** memperlihatkan hubungan beban terhadap *stroke* untuk sistem sambungan kondisi 1D. Berdasarkan **Gambar 27** beban runtuhnya yaitu pada kisaran 35 kN hingga 60 kN. Terlihat pula pada dua spesimen yang diuji mengalami kegagalan lebih dari satu kali. Hal ini dikarenakan pada lapisan PFRP terdapat serat (*mat*) yang berlapis dan memberikan tahanan terhadap sistem sambungan. Serat tersebut satu persatu putus dengan kisaran beban yang bervariasi.

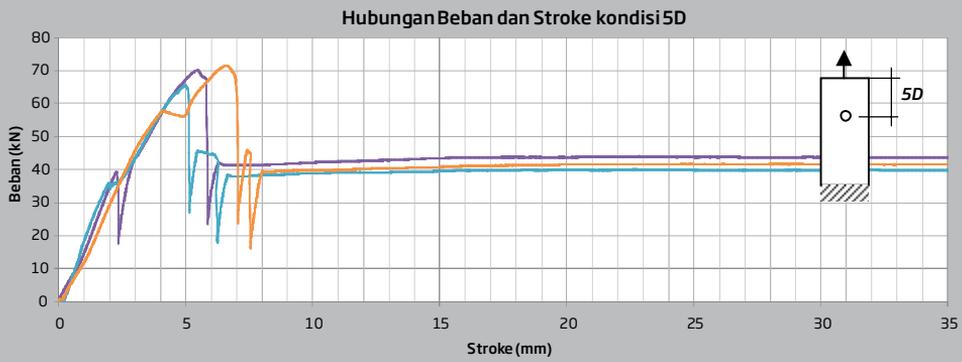
Selanjutnya untuk kondisi 3D dan 5D dapat diperlihatkan pada **Gambar 28** dan **Gambar 29**.

Selanjutnya dapat juga diperkirakan hubungan antara beban maksimum saat leleh pertama terhadap rasio e/d . Dengan menggunakan hasil uji pada variasi e/d yaitu 1,3, dan 5 diperoleh variasi P_{max} seperti tergambar pada **Gambar 30** dengan garis tren cenderung polynomial.

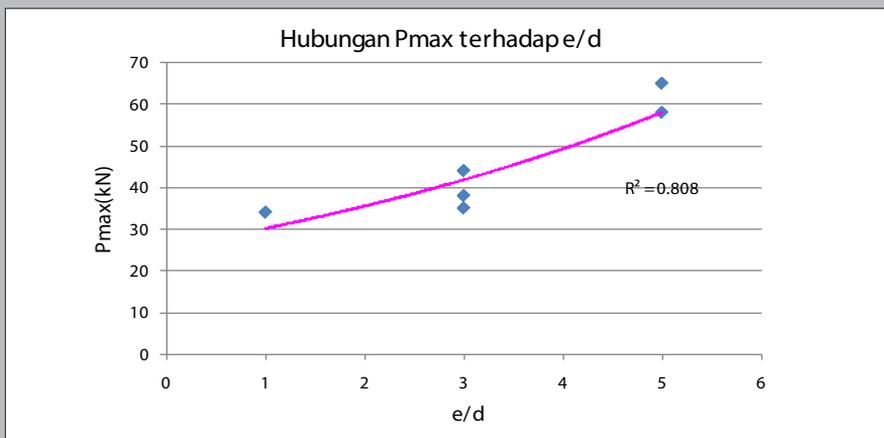
Penelitian mengenai sistem sambungan sebenarnya telah dilakukan oleh beberapa peneliti seperti oleh Cooper dan Turvey (1995). Mereka melakukan kajian eksperimental dan melakukan pengujian pada 81 buah sambungan baut PFRP. Berdasarkan studi tersebut direkomendasikan jarak lubang baut ke tepi (e/d) dan perbandingan lebar PFRP terhadap lubang



Gambar 28 Hubungan Beban dan Stroke Kondisi 3D



Gambar 29 Hubungan Beban dan Stroke Kondisi 5D



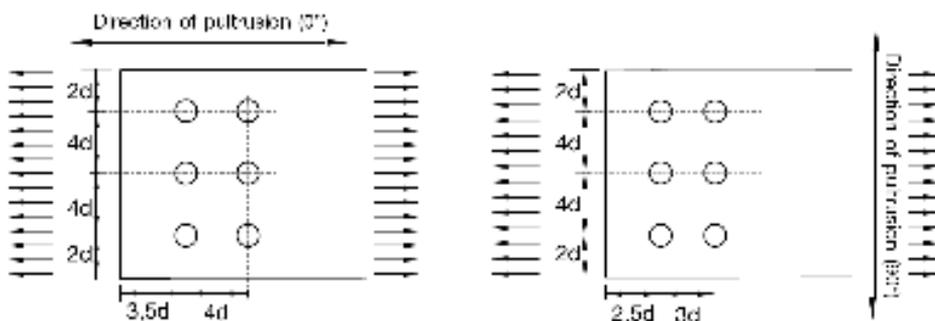
Gambar 30 Pengaruh rasio e/d pada kekuatan sambungan PFRP

Tabel 7 Perbandingan geometri pada sistem sambungan baja dan FRP terhadap beban tarik

Material	Jarak dari tepi ke pusat lubang (e/d)	Rasio lebar PFRP terhadap diameter lubang baut (w/d)
Baja (grade 43)	1,2 - 3	>3
PFRP tebal 6,35 mm*	2 - 4,5 (tipikal 3)	3 - 7 (tipikal 4)
PFRP tebal 6,35 mm**	3	4

*Strongwell (2004) **Cooper dan Turvey (2005)

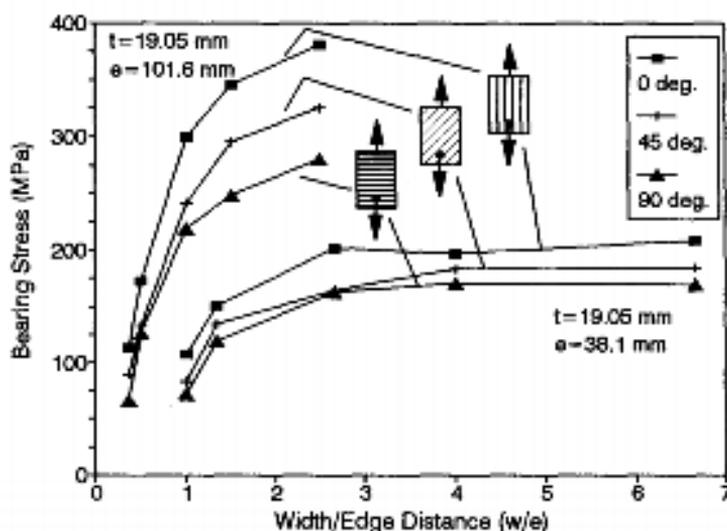
baut (w/d) seperti pada **Tabel 7**. Pada **Tabel 7** juga diperlihatkan rasio e/d dan w/d untuk elemen baja dan PFRP yang diproduksi oleh *Strongwell*. Berdasarkan kedua sumber tersebut, maka dapat direkomendasikan penggunaan nilai e/d sebesar 3 untuk PFRP. Fiberline memberikan jarak baut minimum yang dipengaruhi oleh orientasi pultrusi (**Gambar 31**).



Gambar 31 Jarak baut minimum (Fiberline)

Pengaruh orientasi serat

Susunan laminasi serat merupakan faktor yang juga mempengaruhi kekuatan sambungan dan mekanisme kegagalan PFRP. Susunan laminasi yang paling efisien untuk peningkatan kekuatan mekanik PFRP yaitu laminasi quasi-isotropik dimana laminasi tersusun sedemikian sehingga perilakunya mendekati perilaku material isotropik (misalnya gabungan serat dengan orientasi 0° , 45° , dan 90° secara proporsional). Untuk mengu-



Gambar 32 Pengaruh orientasi serat pada kekuatan sambungan (Rosner,1995)

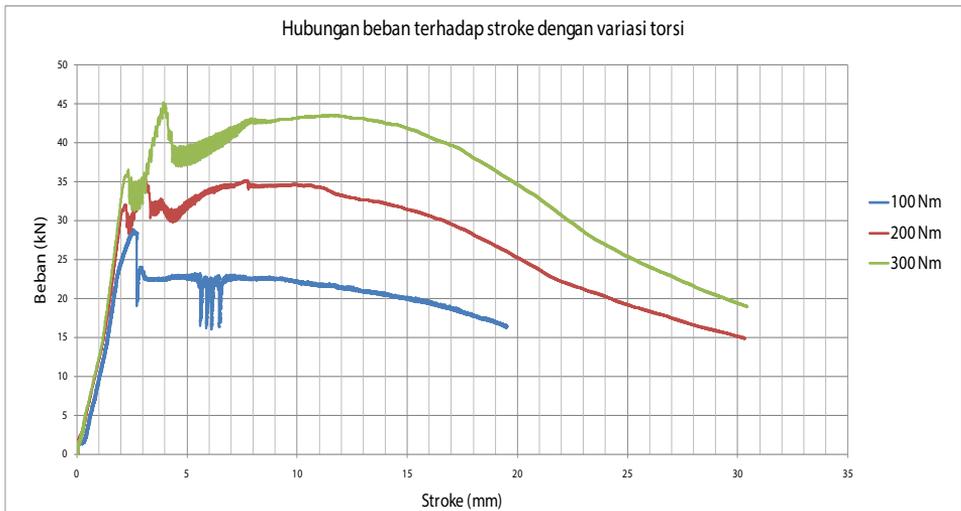
rangi potensi kegagalan geser, dapat digunakan serat minimum dengan orientasi 45°, dan 90°. **Gambar 32** memperlihatkan pengaruh orientasi serat terhadap kekuatan sambungan. Terlihat bahwa serat 0° memberikan kekuatan tumpu yang terbesar dibandingkan serat orientasi 45° dan 90°.

Pengaruh torsi



Gambar 33 Pengencangan baut dengan torsimeter

Selain pengaruh rasio e/d , juga dilakukan perbandingan kekuatan sambungan berdasarkan variasi torsi. Pengencangan baut dilakukan dengan alat torsimeter (**Gambar 33**). Torsi dibuat menjadi 3 variasi yaitu 100 N.m, 200 N.m, dan



Gambar 34 Pengaruh torsi terhadap kekuatan sambungan PFRP

300 N.m. Pengencangan baut dilakukan dengan menggunakan alat torsiometer. Hasil uji memperlihatkan bahwa pemberian torsiometer hingga 300 N.m memberikan peningkatan kekuatan sambungan secara proporsional (**Gambar 34**). ■

3

Analisis dan Desain Sistem Sambungan Baut

3

Analisis dan Desain Sistem Sambungan Baut

Umum

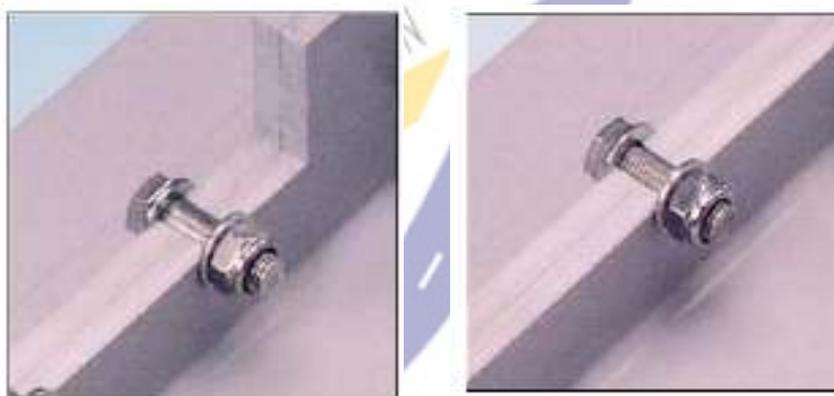
Sambungan baut mentransfer gaya pada elemen struktur yang disambung. Transfer gaya disalurkan melalui mekanisme friksi pada area tekan disekitar baut. Pada perhitungan sambungan baut, penting untuk dipastikan bahwa profil dan baut dapat menahan gaya tekan di area sambungan. Perlu dipastikan juga agar daerah disekitar kelompok baut tidak merusak profil yang disambung. Kapasitas sambungan baut dikatakan memenuhi ketentuan teknis jika sesuai kriteria sebagai berikut :

- Gaya pada baut yang diperlukan (pretension) cukup untuk mencapai keseimbangan terhadap gaya geser eksisting.
- Gaya tekan diantara profil harus dapat diredam secara lokal. Hal ini dapat dipastikan jika gaya pada baut

yang diperlukan tidak melebihi kondisi batas/kuat tumpu pin yang ditetapkan.

- Gaya geser rencana pada sambungan baut harus ditransfer oleh laminasi disekitar kelompok baut dan profil. (Dihindari agar profil tidak mengalami sobek/retak disekitar sambungan baut)

Seluruh kemungkinan mekanisme kegagalan sambungan baut harus diperhitungkan untuk memastikan kelompok baut tidak merusak laminasi FRP. Untuk mencapai kekuatan sambungan yang diharapkan, penting agar sistem sambungan memiliki jarak dan dimensi sesuai dengan **Tabel 7** atau **Gambar 31**.



a. Ulir di luar profil (benar)

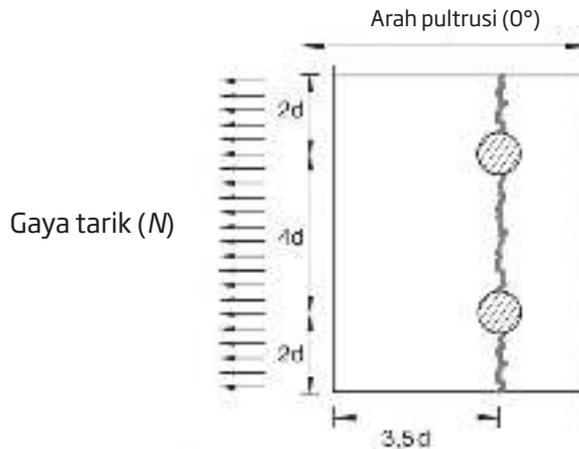
b. Ulir di dalam profil (salah)

Gambar 35 Posisi ulir baut pada sambungan profil FRP

Disarankan agar tidak menempatkan baut lebih dari 4 buah dalam 1 baris. Bila hal ini tidak dapat dihindari maka perlu dilakukan analisis rinci. Baut dipilih sedemikian sehingga bagian ulirnya tidak berada di area laminasi. **Gambar 35** memperlihatkan posisi ulir baut yang salah dan yang benar

Analisis kapasitas sambungan baut

Kegagalan tarik akibat gaya yang bekerja pada arah sumbu pultrusi



Gambar 36 Pola fraktur pada sambungan baut terhadap gaya yang searah sumbu pultrusi

Kegagalan tarik dapat terjadi pada sambungan baut di elemen FRP terhadap beban yang bekerja pada arah pultrusi. **Gambar 36** memperlihatkan pola fraktur pada sambungan baut yang dikenai beban tarik pada arah sumbu pultrusi. Lebar laminasi adalah $8d$ dengan 2 lubang baut ($2d$), sehingga gaya yang dapat dipikul sistem sambungan yaitu sebagai berikut :

$$\begin{aligned} N_{\max} &= (8d - 2d) \times t \times f_{t0^\circ} \\ N_{\max} &= (6d) \times t \times f_{t0^\circ} \end{aligned} \quad (1)$$

Keterangan :

N_{\max} : Gaya maksimum yang dapat dipikul sistem sambungan (kN)

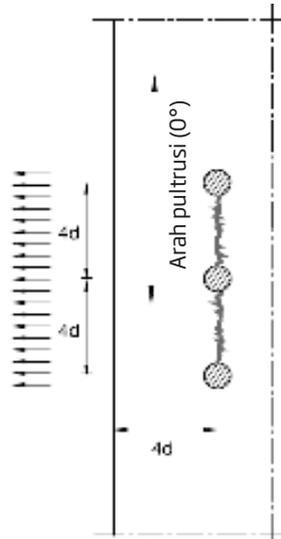
d : diameter lubang baut (mm)

t : tebal profil FRP (mm)

f_{t0° : kuat tarik FRP pada arah sejajar pultrusi (MPa)

Bila gaya yang bekerja tegak lurus pada sumbu pultrusi (90°) maka kuat tarik yang digunakan adalah kuat tarik dalam arah tegak lurus pultrusi (f_{t90°).

Kegagalan FRP akibat gaya yang bekerja tegak lurus pada arah sumbu pultrusi



Gambar 37 Pola fraktur pada sambungan baut terhadap gaya yang tegak lurus sumbu pultrusi

Orientasi gaya yang bekerja pada sambungan memberikan pengaruh pada kapasitas sistem sambungan. Dengan cara yang sama dengan analisis kapasitas sambungan yang mengalami kegagalan tarik, maka perhitungan kapasitas sambungan baut dengan gaya yang bekerja tegak lurus sumbu pultrusi dapat dihitung yaitu sebagai berikut :

$$N_{\max} = (8d - 2d) \times t \times f_{t90^\circ}$$

$$N_{\max} = (6d) \times t \times f_{t90^\circ} \quad (2)$$

Keterangan :

N_{\max} : Gaya maksimum yang dapat dipikul sistem sambungan (kN)

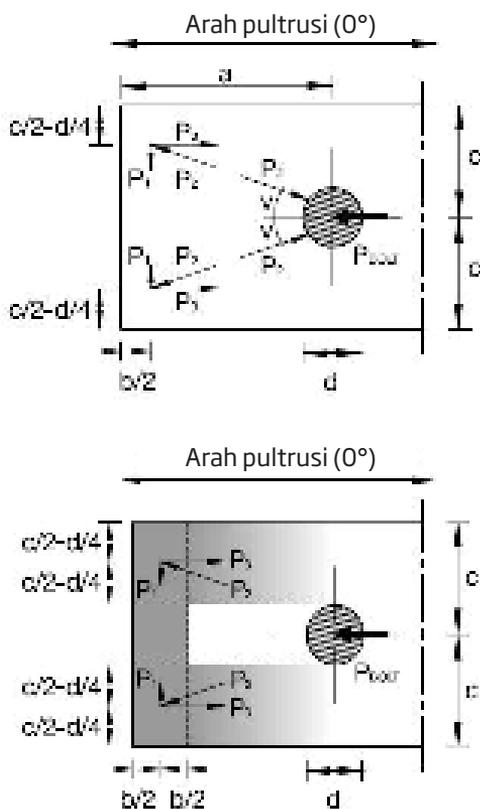
d : diameter lubang baut (mm)

t : tebal profil FRP (mm)

f_{t90° : kuat tarik FRP pada arah tegak lurus pultrusi (MPa)

Formulasi teoritis untuk perhitungan sambungan

Kapasitas baut pada berbagai macam kondisi beban dapat dihitung dengan menggunakan perkiraan distribusi gaya seperti pada **Gambar 38**.



Definisi geometri :

a : jarak dari pusat lubang baut ke tepi profil dalam arah pembebanan (arah memanjang) (mm)

b : lebar area di depan baut dimana gaya antar laminasi diperkirakan dapat terjadi (mm)

c : jarak dari pusat lubang baut ke tepi profil dalam arah tegak lurus pembebanan (mm)

d : diameter lubang baut (mm)

t : tebal profil FRP (mm)

v : sudut sesuai **Gambar 38** dengan

$$\tan(v) = \frac{\left(\frac{c}{2} + \frac{d}{2}\right)}{\left(a - \frac{b}{2}\right)}$$

Gambar 38 Distribusi gaya pada laminasi di sekitar baut terhadap beban geser

Dalam keadaan statis, nilai P_1 , P_2 dan P_3 dapat ditentukan sebagai berikut :

$$P_1 = \frac{1}{2} P_{bolt} \tan(v) \quad (3)$$

$$P_2 = \frac{P_{bolt}}{2 \cos(v)} \quad (4)$$

$$P_3 = \frac{1}{2} P_{bolt} \quad (5)$$

Dengan P_{bolt} adalah beban yang bekerja pada baut

Perlu diberi catatan bahwa formulasi yang diberikan untuk perhitungan kapasitas baut dibuat dengan asumsi geometri sebagai berikut :

$$a = 3,5d$$

$$b = d$$

$$c = 2d$$

Kondisi 1 (*net tension failure*)

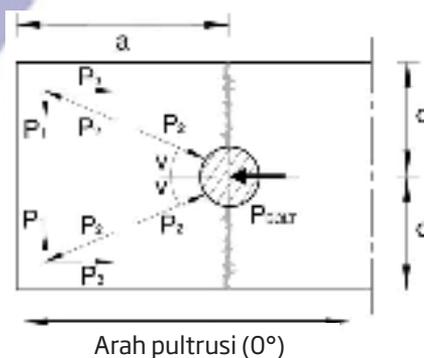
Tegangan tarik pada arah memanjang disekitar baut.

$$f_{t0^\circ} = \frac{P_3}{\left(c - \frac{d}{2}\right)t}$$

$$f_{t0^\circ} = \frac{\frac{1}{2} P_{bolt}}{\left(2d - \frac{d}{2}\right)t} = \frac{\frac{1}{2} P_{bolt}}{\left(\frac{3d}{2}\right)t}$$

Masukkan faktor reduksi γ_m sehingga,

$$P_{bolt} = \frac{3(f_{t0^\circ})(d)(t)}{\gamma_m}$$



Gambar 39 Sambungan baut tunggal dengan moda kegagalan tarik (*net tension*)

Kondisi 2 (cleavage failure)

Tegangan tarik belah (cleavage) di area depan baut.

$$f_{t90^\circ} = \frac{P_1}{(b)(t)}$$

$$f_{t90^\circ} = \frac{\frac{1}{2}P_{bolt} \tan(v)}{(d)(t)} = \frac{\frac{1}{2}P_{bolt} \left(\frac{\left(\frac{c}{2} + \frac{d}{4}\right)}{a - \left(\frac{b}{2}\right)} \right)}{(d)(t)}$$

Masukkan faktor reduksi γ_m sehingga,

$$P_{bolt} = \frac{\left(\frac{24}{5}\right)(f_{t90^\circ})(d)(t)}{\gamma_m}$$

Kondisi 3 (shear out failure)

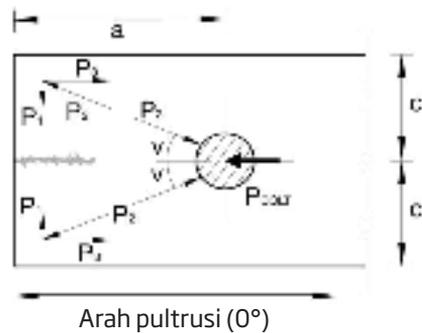
Tegangan geser terlampaui dengan pola fraktur sesuai **Gambar 41**.

$$f_v = \frac{P_{bolt}}{2\left(a - \frac{d}{2}\right)t}$$

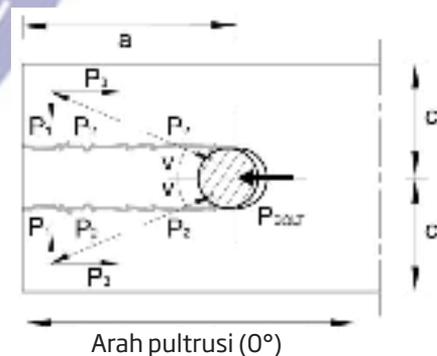
$$f_v = \frac{P_{bolt}}{2\left(3,5d - \frac{d}{2}\right)t}$$

Masukkan faktor reduksi γ_m sehingga,

$$P_{bolt} = \frac{6(f_v)(d)(t)}{\gamma_m}$$



Gambar 40 Sambungan baut tunggal dengan moda kegagalan tarik belah (cleavage)



Gambar 41 Sambungan baut tunggal dengan moda kegagalan geser (shear out)

Kondisi 4 (*bearing failure*)

Tegangan tekan pada bidang kontak baut dan laminasi FRP melampaui kuat tekan dalam arah beban.

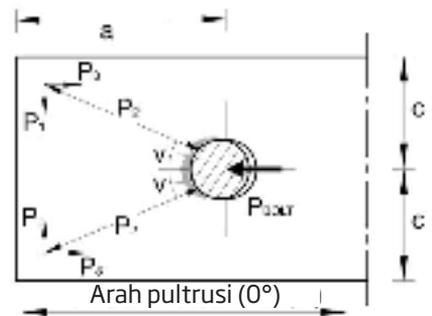
Masukkan faktor reduksi γ_m sehingga,

$$f_{c0^\circ} = \frac{P_{bolt}}{d(t)}$$

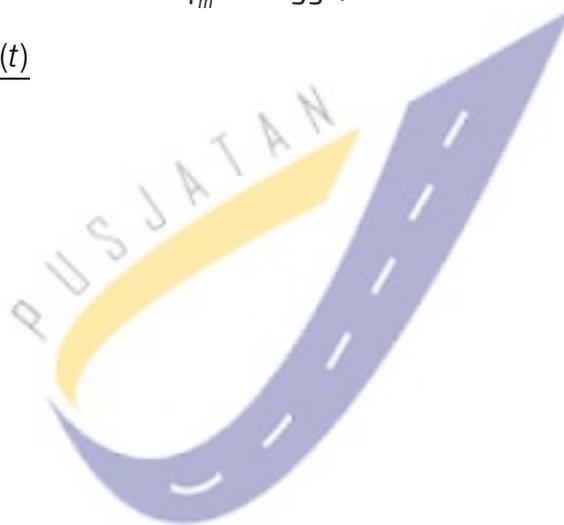
Masukkan faktor reduksi γ_m sehingga,

$$P_{bolt} = \frac{f_{c0^\circ} \cdot d(t)}{\gamma_m}$$

■



Gambar 42 Sambungan baut tunggal dengan moda kegagalan tumpu (*bearing failure*)



4

Filosofi Perencanaan

4

Filosofi Perencanaan

Pendekatan perancangan

Berdasarkan ASCE Structural Plastics Design Manual, pada prinsipnya, tujuan perancangan yaitu agar struktur yang dirancang memiliki probabilitas yang dapat diterima untuk tidak mengalami kegagalan selama masa layan, dengan kata lain struktur komposit yang diperoleh tidak boleh mencapai kegagalan sesuai dengan keadaan batas yang ditentukan dalam kurun waktu umur rencana yang telah ditentukan (ASCE, 1984). Dalam perancangan struktur, dikenal dua jenis pendekatan yang umum digunakan yaitu :

1. Metode Tegangan Ijin (Allowable Stress Design/ASD)
2. Metode Beban dan Kekuatan Terfaktor (PBKT)

Pada sub bab berikut dijelaskan mengenai kedua pendekatan tersebut.

Metode tegangan ijin

Metode tegangan ijin dikenal juga sebagai metode beban kerja (*working stress design*). Metode ini telah digunakan oleh *civil engineer* terdahulu oleh karena kemudahannya. Seiring dengan perkembangan teknologi dan konsep perencanaan, metode tegangan ijin mulai ditinggalkan dan diperkenalkan metode Beban dan Kekuatan Terfaktor (PBKT) yang berbasis pada keadaan batas struktur (kondisi ultimit) kecuali untuk pemeriksaan lendutan struktur.

Pada metode tegangan ijin, digunakan angka keamanan tunggal untuk memperhitungkan variabilitas material, beban, dan kekuatan elemen, termasuk penurunan kekuatan jangka panjang elemen struktur. Oleh sebab itu perencanaan didasarkan atas tegangan ijin bukan kekuatan batas material. Pendekatan ini memperhitungkan pengaruh variasi beban dan tahanan elemen tanpa memberikan kontribusi dua faktor terhadap kehandalan elemen struktur secara keseluruhan (misalnya sistem sambungan). Metode tegangan ijin dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\sum Q_i = \frac{R}{SF} \quad (6)$$

Keterangan :

Q_i : jumlah beban yang bekerja

R : tahanan elemen

SF : angka keamanan

Metode Beban dan Kekuatan Terfaktor (PBKT)

Pendekatan Beban dan Kekuatan Terfaktor (PBKT) digunakan dengan memperhatikan kontribusi pengaruh beban pada struktur dan tahanan elemen. Perencanaan komponen struktur jembatan harus didasarkan pada perencanaan berdasarkan Beban dan Kekuatan Terfaktor (PBKT),

yang harus memenuhi kriteria keamanan untuk semua jenis gaya dalam sesuai dengan persamaan berikut :

$$\sum \eta_i \gamma_i Q_i \leq \phi R_n = R_r \quad (7)$$

Dengan memperhatikan hal-hal sebagai berikut :

Untuk beban-beban dengan nilai maksimum γ_i lebih sesuai maka :

$$\eta_i = \eta_D \eta_R \eta_I \geq 0,95 \quad (8)$$

Untuk beban-beban dengan nilai minimum γ_i lebih sesuai maka :

$$\eta_i = \frac{1}{\eta_D \eta_R \eta_I} \leq 1 \quad (9)$$

Keterangan :

γ_i : faktor beban ke-i

η_i : faktor pengubah respon berkaitan dengan daktilitas, redundansi, dan klasifikasi operasional

η_D : faktor pengubah respon berkaitan dengan daktilitas

η_R : faktor pengubah respon berkaitan dengan redundansi

η_I : faktor pengubah respon berkaitan dengan klasifikasi operasional

ϕ : faktor tahanan

Q_i : pengaruh gaya

R_n : tahanan nominal

R_r : tahanan terfaktor

Sisi kiri persamaan 2 merepresentasikan pengaruh beban sedangkan sisi kanan mewakili kekuatan rencana komponen struktur. Untuk material seperti komposit polimer, yang sangat penting adalah penggunaan metode yang tepat untuk perhitungan R dan menentukan nilai ϕ . Kedua nilai tersebut mewakili level kepercayaan tercapainya kekuatan material untuk kondisi pembebanan tertentu. Disamping itu perhitungan beban (Q) seperti misalnya analisis tegangan atau lendutan juga sangat penting.

Uni Eropa juga menggunakan konsep desain berbasis keadaan batas (limit state design) dengan formulasi sebagai berikut :

$$E_d \leq R_d \quad (10)$$

Dengan,

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_m} \quad (11)$$

Keterangan :

E_d : pengaruh beban (termasuk faktor beban)

R_d : kapasitas terfaktor dengan,

R_k : kapasitas nominal

γ_m : faktor reduksi

Nilai faktor reduksi (γ_m) tergantung pada karakteristik material, kondisi perawatan, proses produksi, dan temperatur seperti tercantum pada **Tabel 8**.

Tabel 8 Faktor reduksi

Koefisien	Deskripsi	Nilai maksimum	Nilai minimum	Fiberline
γ_{m1}	Karakteristik material	2,25	1,15	1,15
γ_{m2}	Kondisi perawatan	1,6	1,10	1,1
γ_{m3}	Proses produksi	2,0	1,0	1,0
γ_{m4}	Temperatur			*

*Faktor reduksi yang direkomendasikan oleh fiberline (**Tabel 9**)

Tabel 9 Faktor reduksi akibat pengaruh temperature (Fiberline)

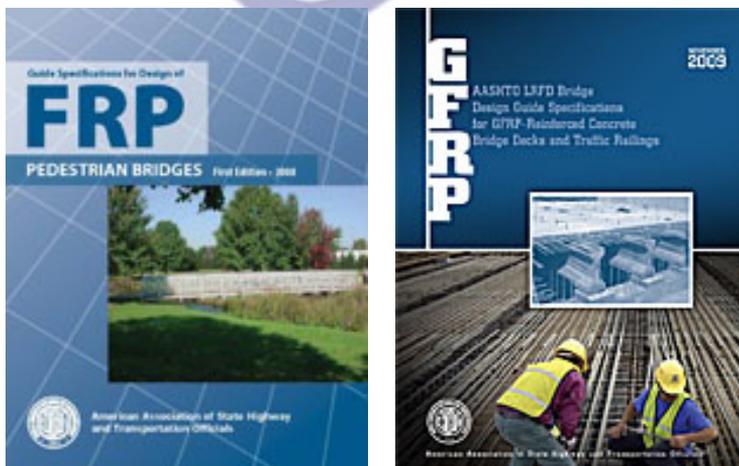
Temperatur (°)	γ_{m4}	
	Beban jangka pendek	Beban jangka panjang
-20 s/d +60	1,0	2,5
80	1,25	3,13

Ketentuan beban rencana

Dokumen standar yang paling banyak diterima untuk penentuan beban rencana terutama di Amerika Serikat yaitu "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI 7-10 (ASCE 2010). Pada dokumen ini tersedia prosedur untuk menentukan beban minimum dan kombinasi beban khusus untuk bangunan gedung dan struktur bangunan lainnya (diluar jembatan). Untuk struktur seperti jembatan, AASHTO telah menerbitkan dua jenis ketentuan (**Gambar 43**) berkaitan dengan jembatan berbahan dasar komposit polimer yaitu :

Guide Specifications for Design of FRP Pedestrian Bridges, 1st Edition, 2008

Ketentuan tersebut tentunya hanya berlaku untuk jembatan pejalan kaki (pedestrian) yang terbuat dari bahan FRP. Secara umum ketentuan ini berisi



Gambar 43 Ketentuan perencanaan jembatan FRP (AASHTO)

filosofi perencanaan jembatan pedestrian berbahan FRP, perencanaan beban (beban pejalan kaki, kendaraan ringan, beban angin, serta kombinasi beban), detail perencanaan (kriteria lendutan, getaran, tegangan ijin, ketebalan minimum FRP, sambungan) lengkap dengan penjelasannya.

ASHTO LRFD Bridge Design Guide Specifications for GFRP-Reinforced Concrete Bridge Decks and Traffic Railings, First Edition, 2009

Ketentuan ini berisi perencanaan lantai atau railing yang diberi penguatan yang berbahan Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP). Penggunaan GFRP memberikan keuntungan yaitu memiliki ketahanan yang baik terhadap korosi dan perilakunya yang nonkonduktif. Oleh karena perilaku GFRP baik dari segi fisik dan mekanik yang sangat berbeda dengan baja, maka diperlukan pedoman yang dapat mengakomodasi perencanaan beton yang ditulangi dengan GFRP.

Angka keamanan

Sama dengan perencanaan material lainnya, maka sebuah angka keamanan harus digunakan untuk perencanaan elemen komposit polimer khususnya pada elemen sambungan. Angka keamanan didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan ultimit dengan tegangan ijin maksimum kondisi beban kerja. Perbandingan tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$SF = \frac{\sigma_u}{\sigma_a} \quad (12)$$

Keterangan :

SF : angka keamanan

σ_u : tegangan ultimit (MPa)

σ_a : tegangan ijin (MPa)

Angka keamanan untuk profil komposit satu arah disarankan menggunakan nilai SF diantara 3 hingga 4. Namun, perlu diberikan catatan bahwa rentang angka keamanan tersebut hanya berlaku untuk kondisi

lingkungan dan pembebanan yang normal. Sebuah survei lapangan yang dilakukan oleh Mossalam (1998) memberikan ilustrasi bahwa kegagalan prematur dapat terjadi bila pada perencanaan komposit polimer tidak memperhitungkan angka keamanan akibat kondisi lingkungan yang ekstrim. Sebagai contoh seperti perhitungan pada ASCE Structural Plastics Section Manual (ASCE, 1985) tentang kehilangan tegangan pada baut akibat perubahan temperatur yang tinggi dan lingkungan yang korosif, kemudian pemilihan kriteria untuk struktur yang terkena api.

Properti mekanik minimum

Properti mekanik profil komposit polimer harus disediakan oleh produsen yang membuatnya. Produsen harus mengeluarkan semacam sertifikat yang menunjukkan properti mekanik minimum yang dijamin terpenuhi (guaranteed). Sebagai contoh, nilai kuat geser ultimit didefinisikan sebagai kekuatan rata-rata spesimen (yang diuji berdasarkan ASTM D5379, ASTM D5379M-05) dikurangi dengan tiga kali deviasi standar sebagai berikut :

$$\tau_u^{gr} = \tau_u^{mean} - 3S \quad (13)$$

Keterangan :

τ_u^{gr} : tegangan geser karakteristik

τ_u^{mean} : tegangan geser rata-rata

$3S$: deviasi standar

Properti karakteristik tersebut memberikan probabilitas nilai tersebut terlampaui sebesar 99,87% (Mutsuyoshi et al, 1990). Deskripsi metode yang digunakan untuk menentukan properti karakteristik harus disediakan oleh produsen.

Usulan filosofi perencanaan

Saat ini, tidak ada pendekatan yang umum dan seragam untuk perencanaan profil komposit polimer termasuk elemen dan sistem sambungan. Penggabungan konsep perencanaan tidak mungkin dilakukan oleh karena

terbatasnya informasi hasil penelitian eksperimental terhadap perilaku mekanik profil komposit polimer. Terdapat variasi pendekatan yang telah berkembang seperti misalnya EUROCOMP Design Code and Handbook yang dipublikasikan tahun 1996 (Clarke, 1996) menggunakan pendekatan PBKT. Di Amerika, beberapa peneliti mengadopsi pendekatan yang sama dengan menggunakan faktor beban asumsi dalam merencanakan profil komposit polimer seperti Parbhakaran et al (1996a dan 1996b).

Filosofi perencanaan yang diusulkan pada naskah ini dipergunakan dalam analisis, perencanaan, dan evaluasi struktur yang terbuat dari komposit polimer (FRP) menerus. Disamping properti mekanikal, thermal, dan tegangan pada FRP, sifat fisik dan aging serta respons viskoelastik memiliki pengaruh penting dalam perencanaan komponen struktur FRP. Terdapat banyak angka keamanan dan faktor tahanan yang harus diperhitungkan dalam perencanaan terutama untuk perhitungan kinerja jangka panjang, kombinasi beban, geser antar interlaminar dan pengaruh tepi (edge effect), cacat lokal, korosi galvanis, flammabilit, dan kondisi lainnya.

Struktur harus direncanakan agar terhindar dari kegagalan katastropik akibat beban impak atau api. Lebih jauh lagi, untuk profil komposit polimer, potensi kegagalan harus disesuaikan dengan kondisi tertentu seperti :

1. Mengurangi tingkat bahaya (misalnya perencanaan kerb untuk mengalihkan kendaraan yang telah menabrak guardrail)
2. Perencanaan dengan derajat ketidaktentuan yang tinggi
3. Pemilihan atau perencanaan penampang untuk menyerap energi akibat benturan.
4. Penggunaan material yang tepat, sistem kontrol aktif dan pasif.

Oleh sebab itu baik pendekatan berdasarkan tegangan kerja (WSD) atau pendekatan beban dan kekuatan terfaktor (PBKT) dapat diusulkan sebagai dua metode alternatif untuk perencanaan komposit polimer.

Filosofi berdasarkan tegangan kerja

Seperti telah disampaikan sebelumnya, bahwa pada pendekatan berdasarkan tegangan kerja, aspek keamanan diperoleh dengan memberikan angka keamanan terhadap tegangan ultimit atau tegangan lelehnya. Untuk material komposit polimer, aspek keamanan pada kondisi beban kerja diperoleh dengan memastikan regangan yang terjadi pada serat dalam segala arah tidak boleh melampaui 20% regangan minimum jangka panjang pada laminasi. Level tegangan pada laminasi harus dibatasi berdasarkan kriteria kegagalan yang sesuai dengan memperhitungkan margin keamanan. Sebagai contoh untuk menentukan tegangan runtuh dapat digunakan kriteria kegagalan Hoffman-Hill atau Tsai-Wu. Kriteria alternatif harus menunjukkan kesesuaian dengan level tegangan batas sebagai kriteria desain. Dalam hal tertentu juga perlu diperhitungkan kegagalan selain kegagalan lapis pertama dalam perencanaan.

Filosofi berdasarkan beban dan kekuatan terfaktor

Struktur yang dirancang harus dapat menahan semua aksi (lentur, geser, aksial, dan kombinasinya) selama masa layan dan memiliki durabilitas yang cukup (struktur masih berfungsi selama masa layan). Beban maksimum terfaktor $1,3 (1,67 (LL+IM)+DL)$ harus kurang dari 20% regangan jangka panjang laminasi. Pengaruh intensitas beban yang acak, ketidakpastian prosedur analitis, respon struktur nonlinier, ketidakakuratan komputasi, dan aproksimasi yang mengabaikan pengaruh lokal harus diperhitungkan saat menentukan koefisien probabilitas.

Perancangan harus memperhitungkan kegagalan daktail dengan memastikan pada keadaan batas layan (deformasi, vibrasi, retak, dll) tercapai sebelum keadaan batas ultimit (keruntuhan, ketidakstabilan, dll). Disamping itu, perencanaan harus memperhitungkan kondisi layan, dinamik, dan khusus. Untuk struktur khusus yang tidak secara detail dibahas pada naskah ini dapat menggunakan ketentuan usulan ini dengan penambahan kriteria desain yang diperlukan yang bisa merujuk pada

program penelitian militer, penerbangan, atau penelitian FRP yang sedang berjalan di dalam ataupun di luar negeri.

Perilaku komposit material, bentuk, dan analisis sistem

Properti material pembentuk komposit menentukan karakteristik komposit. Properti fisik dan mekanik laminasi harus diukur pada suhu 75 ± 4 °F dan 50 ± 5 % kelembapan relatif. Properti mekanik harus diukur pada suhu yang ekstrim 120 ± 4 °F dan 85 ± 5 % RH. Prekondisi coupon diperlukan sesuai dengan ASTM D638 sebelum pengujian. Lama perawatan, temperatur, dan tekanan harus ditentukan pada proses produksi. Kandungan pori harus ditetapkan dengan kadar kelembapan dan perubahan dimensi (*swelling*). Untuk kondisi higrothermal yang ekstrim. Data sheet properti harus dibuat untuk laminasi individual dan komposit laminasi untuk kondisi temperatur dan kelembapan minimum, rata-rata, dan maksimum. Kuat geser antar laminasi harus ditentukan untuk laminasi individual. Kuat tarik, kuat tekan, dan kuat lentur serta rasio Poisson's harus diukur pada coupon komposit laminasi.

Properti fatik harus ditentukan dengan melakukan uji fatik sesuai dengan ASTM D 3039. Kerusakan antar laminasi akibat impak harus diuji dengan menggunakan uji drop-weight. Dengan cara yang sama, rangkai, dan keruntuhan tegangan harus dikuantifikasi pada temperatur layan maksimum (ASTM D 3039). Properti karakteristik minimum dan temperatur transisi serat gelas harus ditentukan untuk perekat dengan pengujian sambungan yang mewakili. Properti mekanik, suhu, dan fatik perekat, selama degradasi lingkungan dan perilaku rangkai, harus ditetapkan oleh *supplier* material dalam bentuk *data sheet* properti.

Elemen FRP dalam bentuk coupon, perilaku mekaniknya yaitu linier hingga mengalami kegagalan. Tetapi, untuk serat yang khusus, produksi dengan tangan (*lay-up*), bentuk profil dapat berperilaku nonlinier, serta sistem struktur FRP juga dapat berperilaku nonlinier tergantung pada metode penyambungan pada level pembebanan tertentu. Perilaku

nonlinier ini harus dipahami dengan baik oleh perencana dan struktur FRP harus dirancang dengan baik khususnya pada rentang nonlinier. Model mikromekanik dan makromekanik harus digunakan untuk perhitungan kekuatan dan kekakuan elemen komposit. Perubahan terhadap waktu properti elastik FRP, pengaruh lingkungan, dan beban (statik dan dinamik) harus diperhitungkan dalam analisis.

Nonlinier material

Bila digunakan analisis inelastik dengan memperhitungkan nonlinier material, maka reanalisis harus dilakukan untuk respons kegagalan lapis pertama struktur FRP setelah penetapan mekanisme keruntuhan dan moda kegagalan. Analisis harus dapat memastikan moda kegagalan apakah termasuk kegagalan lentur, geser, tekuk, dll. Perencana harus menentukan mekanisme inelastik untuk kontrol kegagalan. Pendekatan tersebut sangat rumit dan membutuhkan pemahaman yang mendalam terhadap mekanika FRP dan laminasi.

Nonlinier geometri

Nonlinier geometri harus diperhitungkan dalam analisis jika deformasi menyebabkan perubahan pada konfigurasi struktur (misalnya perubahan sudut antara sambungan balok dan kolom, efek P-Delta, dll). Model nonlinier geometri harus didasarkan pada data uji FRP dan harus memperhitungkan retak inisial elemen yang sangat berpengaruh pada analisis stabilitas. Untuk komponen yang langsing, karakteristik visko-elastik harus diperhitungkan dalam analisis, disamping juga interaksi gaya pada elemen. Pada analisis nonlinier harus digunakan beban terfaktor dan prinsip superposisi tidak berlaku pada rentang nonlinier.

Persyaratan prosedur analitis

Prosedur analitis berikut dapat digunakan untuk perencanaan FRP yaitu sebagai berikut :

1. Idealisasi geometri dan perilakunya (misalnya elastik, dinamik, nonlinier) struktur.
2. Lakukan analisis tegangan laminasi terhadap beban dengan atau tanpa beban higrothermal, dengan memperhitungkan tegangan interlaminasi dan pengaruh tepi dengan menggunakan "teori laminasi klasik" dan lakukan setelah menetapkan hubungan tegangan regangan laminasi. Teori netting dapat dilakukan dengan mengabaikan pengaruh resin pada laminasi. Perlu dicatat bahwa membran laminasi, lentur, atau tegangan kombinasi dapat dihitung. Ekspansi thermal dan koefisien swelling harus digunakan dalam analisis untuk memperhitungkan konduksi thermal dan difusi kelembapan. Properti viskoelastik nonlinier komposit terhadap perubahan temperatur dapat digunakan hanya jika dalam kondisi tertentu.
3. Perhitungkan pengaruh ketebalan, tegangan sisa, regangan seiring perubahan lapis FRP. Kegagalan dapat terjadi pada bagian tepi FRP akibat delaminasi dimana terjadi tegangan interlaminasi yang tinggi akibat kekuatan interlaminasi yang rendah. Teori laminasi klasik yang mengasumsikan "plane stress" tidak dapat memprediksi tegangan tepi. Oleh karenanya, kegagalan bagian tepi FRP dapat dihindari dengan :
 1. Pemilihan urutan penumpukan laminasi yang baik,
 2. Meminimalkan ketidakcocokan diantara rasio Poisson,
 3. Identifikasi koefisien ekspansi thermal,
 4. Perhatikan koefisien swelling pada lamina, sebagai contoh lamina yang berada di tengah dapat terbuat dari material dengan modulus geser rendah untuk meminimalkan pengaruh geser.
4. Hitung distribusi gaya dalam dan perpindahan struktur, termasuk pengaruh lokal.
5. Abaikan pengaruh deformasi geser dan aksial jika nilainya kurang dari

10% hingga 15% terhadap pengaruh akibat lentur. Pengaruh aksial dapat diperhitungkan untuk perhitungan stabilitas.

6. Gunakan pembebanan dan kombinasi beban sesuai dengan peraturan yang berlaku misalnya *ASCE Minimum Design Loads for Building and Other Structures ASCE/SEI 7-10* untuk bangunan gedung atau *Guide Specifications for Design of FRP Pedestrian Bridges, 1st Edition, 2008* untuk jembatan pejalan kaki (pedestrian) yang terbuat dari bahan FRP.
7. Perhitungkan pengaruh ketidakseragaman geometrik dalam proses produksi dan pengaruh orde dua dalam analisis.
8. Seluruh metode analisis harus memenuhi keseimbangan gaya, pemeriksaan kompatibilitas, hubungan tegangan-regangan, dan cek stabilitas (misalnya : tekuk). Kemudian, deformasi atau kapasitas rotasi sambungan harus diperhitungkan dalam analisis. Jika memungkinkan, sambungan sebisa mungkin diletakkan jauh dari daerah yang kritis.
9. Pengaruh anisotropy bahan harus diperhitungkan. Properti lamina dihitung sebagai fungsi tipe, fraksi volume, dan orientasi serat, sedangkan properti laminasi dihitung sebagai fungsi jumlah lapis.

Pembuatan spesifikasi perencanaan

Dalam kaitannya dengan pembuatan spesifikasi perencanaan PFRP, ahli struktur akan :

1. Menetapkan properti material termasuk nilai karakteristik serta nilai rencananya dimana kedua nilai tersebut berkaitan dengan angka keamanan. Oleh karena kegagalan pada komposit bersifat lokal, ketergantungan karakteristik lokal dengan variasi yang besar membuat analisis kegagalan menjadi semakin rumit dibandingkan dengan analisis properti fisik.
2. Membuat properti geometrik termasuk ketidaksempurnaan dan toleransi dimensi (misal : panjang nominal terhadap panjang aktual).

3. Memasukkan beban termasuk penempatannya, *load case*, kombinasi. Seluruh beban termasuk variasinya terhadap waktu.

Persyaratan perencanaan

Beberapa persyaratan perencanaan PFRP dapat dijabarkan sebagai berikut :

- Semua *load case* dan kombinasinya, termasuk kemungkinan deviasi harus diperhitungkan dalam perencanaan.
- Seluruh persyaratan keadaan batas layan dan keadaan batas ultimit harus dipenuhi.
- Durabilitas harus dipenuhi dengan mempertimbangkan kriteria kinerja, kondisi lingkungan, proses fisika dan kimia material penyusunnya pada FRP, detailing struktur, kualitas produk dan upaya perlindungan termasuk pemeliharaan selama masa layan.

Keadaan batas

Untuk menghindari kegagalan daktail, perencanaan harus memperhitungkan aspek layan, kekuatan, stabilitas, keadaan batas ekstrim pada komponen atau sistem struktur. Keadaan batas tersebut dapat disebutkan sebagai berikut :

- Keadaan Batas Layan (Serviceability Limit State)
Termasuk didalamnya yaitu pembatasan defleksi, rotasi, retak, vibrasi, ketidakstabilan, respon manusia harus ditetapkan seperti penentuan rasio panjang terhadap tinggi profil, ketebalan sayap, rasio lebar terhadap tinggi profil.
- Keadaan Batas Kekuatan (Strength Limit State)
Pemeriksaan keadaan batas ultimit dimana pengaruh beban terfaktor dibandingkan dengan tahanan terfaktor. Nilai faktor tahanan (reduksi) bervariasi untuk kasus lentur, geser, aksial, tekan, dsb.

- Keadaan Batas Kestabilan (Stability Limit State)
Elemen struktur harus diperiksa terhadap gelincir, *overturning*, gaya angkat, dan tekuk lokal maupun global.
- Keadaan Batas Ekstrim (Extreme Limit State)
Misalnya kondisi gempa, maka faktor tahanan diambil sebesar 1. ■



Daftar Pustaka

- ASTM D638," Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics"
- ASTM D790,"Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and electrical Insulating Material"
- Clarke, J.L., (1996), "Structural Design of Polymer Composites", EURO-COMP design code and handbook. E & FN Spon/Chapman & Hall, London.
- ET Techtonics, Inc "Proposed AASHTO Guide Specifications for the Design of FRP Pedestrian Bridges".
- Fiberline, "Fiberline Design Manual", www.fiberline.dk, 2003
- Headquarter Department of Army, (1986), Field Manual No 5-277, "Bailey Bridges".
- Keller, T (2003) "Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction", Structural Engineering Documents, IABSE.
- Kendall, D (2010), "Development in FRP Bridge Design".
- Kretsis, G and Matthews, FL (1985), "The Strength of Bolted Joints in Glass Fibers/Epoxy Laminates", Composites, 16(2), 92-102.
- MFGC, (2003), "Designing with Fiber Reinforced Plastics/Composites".
- Mossalam, Ayman S (2011) "Design Guide for FRP Composites Connection", ASCE.
- Mutsuyoshi, H, Uehara, K., Machida, A. (1990), " Mechanical properties and design method of concrete beam reinforced with carbon fiber reinforced plastics", Trans Japan Concrete Inst, Vol 12, Japan Concrete Institute, Tokyo, pp. 231-238.
- NCHRP 20-07 Task 244, 2009 "LRFD Guide Specifications for the Design of Pedestrian Bridges".
- Park, JS (2009) "Experimental and Analytical Investigations on The Bolted Joints in Pultruded FRP Structural Member, APFIS-Korea.
- Prabhakaran, R Razzaq, Z, and Devara, S (1996a) "Load and Resistance Factor Design (LFRD) Approach for bolted Joints in pultruded composites, Composites Part B, Infrastructure special issues, 351-360.
- Prabhakaran, R Razzaq, Z, and Devara, S (1996b) "Load and Resistance Factor Design (LFRD) Approach for reinforced plastic channel beam buckling, Composites Part B, 361-369.

- Rosner, (1995) "Bolted Connections for Fiber-Reinforced Composites Structural Member", Journal of Material in Civil Engineering, Univ Manitoba, Canada.
- Sentra Teknologi Polimer (STP)-BPPT, (2013), "Laporan Pelaksanaan Kerja Sama Penelitian Puslitbang Jalan dan Jembatan & STP".
- Thermo Nicolet, (2001), "Introduction to Fourier Transform Infrared Spectrometry"
- Tuakta, C (2005), "Use of Fiber Reinforced Polimer Composites in Bridge Structure", MIT Thesis.



Badan Penelitian dan Pengembangan
Kementerian Pekerjaan Umum
www.pusjatan.pu.go.id