

Sambungan Adesif Model Tirus-Dalam untuk Pipa Komposit yang Mendapat Beban Tekanan Internal

Jamiatul Akmal

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Lampung
Jl. Sumantri Brodjonegoro 1 Bandar Lampung
E-mail: jamiatulakmal@yahoo.com

Abstrak

Sambungan adesif biasa dipakai untuk menyambung pipa komposit. Persoalan yang sering terjadi adalah adanya kebocoran jika pipa mendapat tekanan internal. Berdasarkan analisis yang dilakukan, diketahui bahwa distribusi tegangan pada lapisan adesif tidak merata, tetapi terkonsentrasi di pinggir sambungan. Pada studi ini diusulkan model tirus-dalam untuk distribusi tegangan lapisan adesif yang lebih merata. Teori ini divalidasi dengan mengukur distribusi tegangan dengan sensor *strain gauge* yang dipasangkan searah tegangan prinsipal. Untuk mengamati modus kegagalannya, dilakukan pengujian dengan memberikan tekanan sampai sambungan mengalami kebocoran. Spesimen sambungan dipotong-potong pada posisi terjadinya kebocoran untuk selanjutnya diamati bentuk kegagalan pada penampang potongannya. Dari pengamatan yang dilakukan terhadap tiga spesimen terlihat bahwa kegagalan terjadi pada permukaan batas antara material adesif dengan material pipa/kopler (*adhesive failure mode*). Hal ini menunjukkan bahwa kekuatan ikat secara adesif (*adhesive bonding strength*) lebih rendah daripada kekuatan adesif itu sendiri (*cohesive bonding strength*).

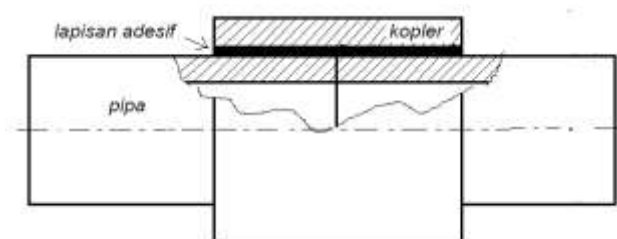
Keywords: sambungan adesif, pipa komposit, strain gauge, kekuatan bonding, tekanan internal

Pendahuluan

Bahan komposit seperti resin termoset yang diperkuat dengan serat *fiberglass* telah digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk dalam sistem perpipaan. Saat ini pipa komposit telah dipakai dalam berbagai bidang seperti dalam industri kimia, industri pulp dan kertas, industri minyak/gas lepas pantai dan aplikasi lainnya [1].

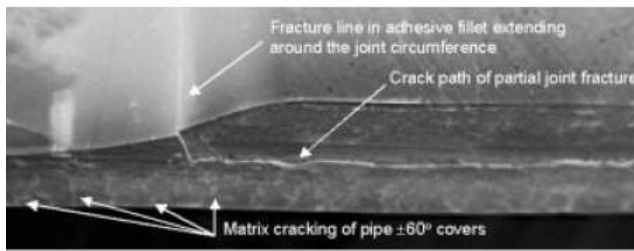
Dalam aplikasinya, karena keterbatasan proses manufaktur, persyaratan inspeksi, aksesibilitas, transportasi dan keterbatasan lainnya menjadikan sambungan pada pipa menjadi sesuatu hal yang tidak bisa dihindari. Hal ini tentu menimbulkan persoalan tersendiri, karena sambungan dapat menjadi sumber kelemahan dan akan menambah berat sistem itu sendiri [2].

Salah satu jenis sambungan yang biasa dipakai untuk pipa komposit adalah sambungan adesif. Sambungan adesif terdiri dari dua pipa *overlapping* yang disatukan oleh zat perekat yang disebut lapisan adesif, salah satu contohnya diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Sambungan adesif pada pipa

Permasalahan yang sering terjadi pada sambungan adesif adalah kebocoran akibat tekanan internal. Kebocoran tersebut umumnya dimulai dari bagian pinggir sambungan dan selanjutnya merambat ke bagian tengah. Beberapa peneliti pun telah melakukan kajian-kajian untuk menganalisis fenomena ini dan diantaranya ada yang mengusulkan inovasi rancangan sambungan untuk mengatasi kebocoran tersebut. Misalnya P. Mertiny & F. Ellyin [3] melakukan analisis kegagalan terhadap bocornya sambungan adesif. Selanjutnya peneliti ini mengusulkan model *chamfer joint* (tirus pada kopler bagian luar) seperti yang terlihat pada Gambar 2. Kenyataannya kebocoran masih terjadi dan selalu dimulai dari bagian pinggir sambungan.



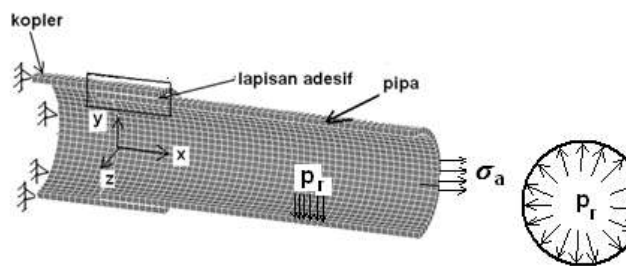
Gambar 2 Kegagalan pada sambungan tirus dimulai dari bagian pinggir (Mertiny dan Ellyin, 2006)

Peneliti lainnya yang mencoba mengembangkan model sambungan adesif adalah J. Akmal dkk. [4], dengan mengusulkan pembuatan alur pada pinggir kopler. Dari analisis numerik, sambungan ini relatif efektif untuk menurunkan konsentrasi tegangan di pinggir sambungan, namun dinilai sulit dilakukan dan kurang aplikatif.

Dengan latar belakang sebagaimana yang diuraikan diatas, penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan rancangan sambungan yang lebih terintegrasi dan lebih aplikatif.

Analisis Numerik untuk Sambungan Adesif yang Mendapat Beban Tekanan Internal

Analisis numerik dilakukan untuk mengetahui distribusi tegangan jika sambungan mendapat beban tekanan internal. Gambar 3 memperlihatkan bentuk elemen dan beban tekanan internal yang diberikan.



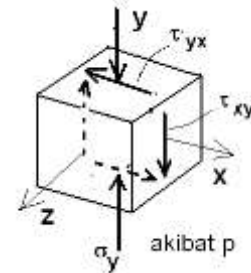
Gambar 3 Bentuk elemen dan beban tekanan internal

Tekanan internal yang terjadi pada pipa dapat diklasifikasikan menjadi tekanan internal radial (p_r) dan tegangan aksial (σ_a). Tekanan p_r bekerja pada dinding silinder bagian dalam sedangkan σ_a adalah tekanan searah aksial. Pada model sambungan yang dianalisis, tekanan p_a diaplikasikan pada permukaan penampang pipa, dimana tekanan ini memenuhi persamaan:

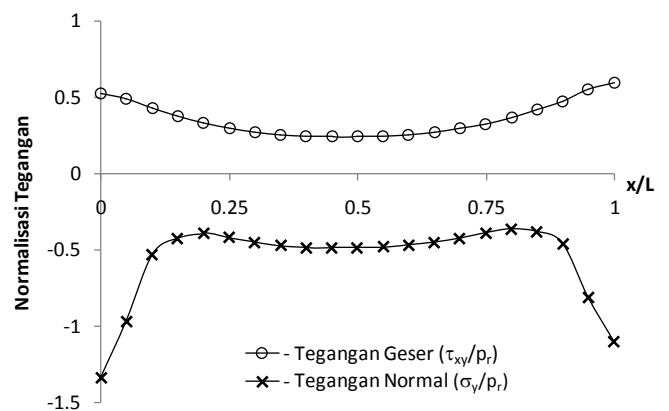
$$\sigma_a = p_r \cdot \frac{(\pi D^2 / 4)}{\pi D t} = p_r \cdot \frac{D}{4t} \quad (1)$$

Tegangan yang dianalisis adalah tegangan geser

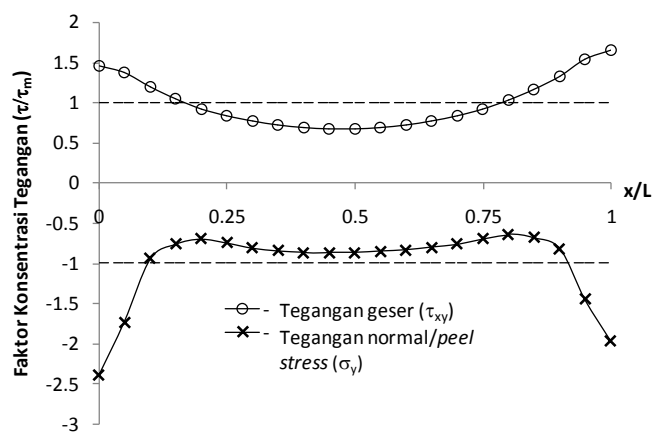
τ_{xy} dan tegangan normal (*peel stress*) σ_y , sebagaimana yang terlihat pada Gambar 4. Pada Gambar 5 ditampilkan tegangan-tegangan tersebut yang dinormalisasi dengan tekanan internal p_r . Sedangkan Gambar 6 menampilkan faktor konsentrasi tegangan, yaitu normalisasi dengan τ_m .



Gambar 4 Keadaan tegangan pada lapisan adesif jika mendapat beban tekanan internal.



Gambar 5 Distribusi tegang normal dan tegangan geser akibat tekanan internal.



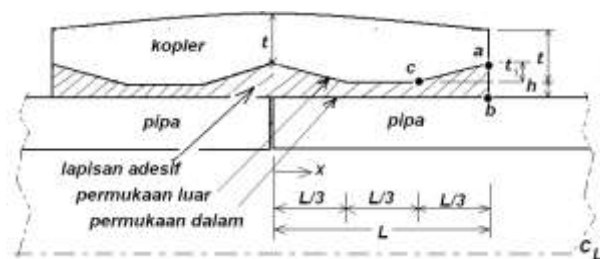
Gambar 6 Faktor konsentrasi tegangan normal dan tegangan geser akibat tekanan internal.

Rancangan Baru untuk Sambungan Adesif Pipa Komposit

Pada makalah ini diusulkan model rancangan baru untuk sambungan adesif yang relatif berbeda jika dibandingkan dengan rancangan yang telah ada sebelumnya. Pada rancangan baru dihindari melakukan proses modifikasi

pada pipa dengan *machining proses*, karena akan memperlemah kekuatan pipa. Hal ini juga dimaksudkan untuk kemudahan pengerjaan di lapangan. Salah satu rancangan baru yang diusulkan disebut dengan **model sambungan tirus-dalam**.

Pada model sambungan tirus-dalam, pembuatan tirus (*chamfer*) dilakukan pada kopler bagian dalam sebagaimana yang diperlihatkan pada Gambar 7. Pembuatan tirus ini sekaligus juga akan menambah ketebalan lapisan adesif pada lokasi yang bersangkutan. Pada bagian pinggir sambungan, penampang kopler makin tipis sedangkan penampang adesif semakin tebal. Permukaan luar kopler dibuat melengkung untuk mempertahankan ketebalan kopler agar tetap sebesar t di bagian tengah (pada $x=0$). Pada analisis yang dilakukan, bentuk kelengkungan ini tidak diperhitungkan (diabaikan). Tebal lapisan adesif (h) ditetapkan sebesar 1 mm, berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Vallee dkk (2010) dan diasumsikan berlaku juga pada model ini. Untuk mendapatkan rancangan yang optimal, dilakukan simulasi numerik untuk mendapatkan kemiringan tirus agar distribusi tegangan lebih merata. Kemiringan tirus tersebut didefinisikan dengan rasio t_1/t yang optimum pada rasio 0.6



Gambar 7 Model sambungan tirus-dalam

Bahan yang digunakan dan Proses Pembuatan Model Sambungan Tirus-Dalam

Bahan pipa terbuat dari resin *polyester* sebagai matriks dan serat *E-Glass* sebagai penguat. Sambungan adesif juga dibuat dari material yang sama. Salah satu keunggulan model tirus-dalam adalah pipa yang akan disambung tidak perlu di-*machining*. Dua ujung pipa diposisikan sejajar dan dipasang *stopper* untuk mengatur ketebalan adesif. Gambar 8 memperlihatkan proses pemasangan lapisan adesif.



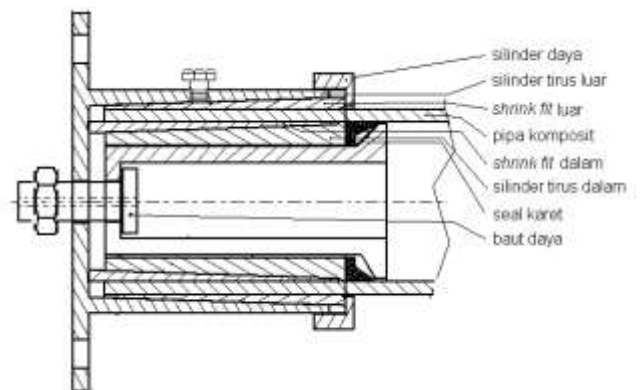
Gambar 8 Proses pemasangan lapisan adesif
Proses selanjutnya adalah pembuatan kopler dengan proses *lay-up*, seperti yang terlihat pada Gambar 9. Pada Gambar 9 diperlihatkan juga foto sambungan yang telah selesai.



Gambar 9 Proses *lay-up* kopler dan Sambungan yang telah selesai

Alat Uji (*Test Rig*)

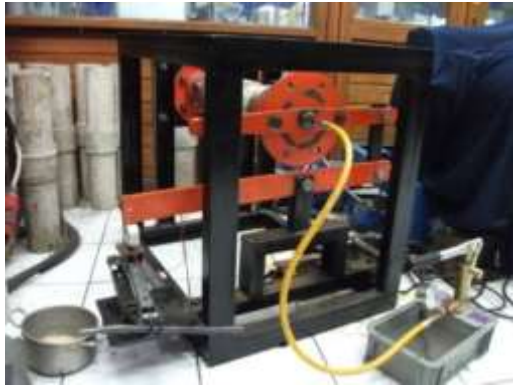
Kedua ujung pipa dipegang oleh holder yang bisa menahan pipa terhadap berbagai beban, termasuk beban tekanan internal. Gambar 10 memperlihatkan rancangan konseptual holder dan Gambar 11 memperlihatkan fotonya. Set-up pengujian lengkap diperlihatkan pada Gambar 12.



Gambar 10 Rancangan konseptual *holder*



Gambar 11 Foto bagian-bagian *holder*

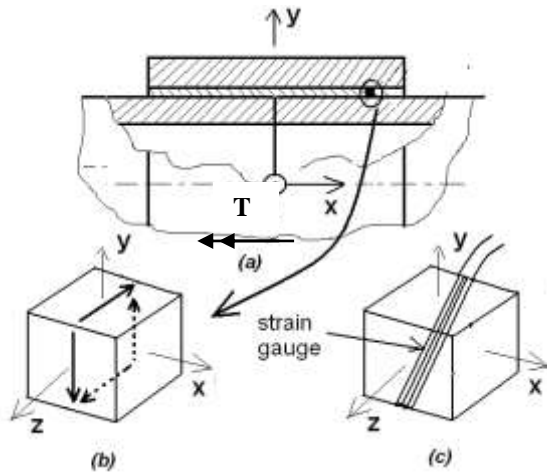


Gambar 12 Set-up pengujian

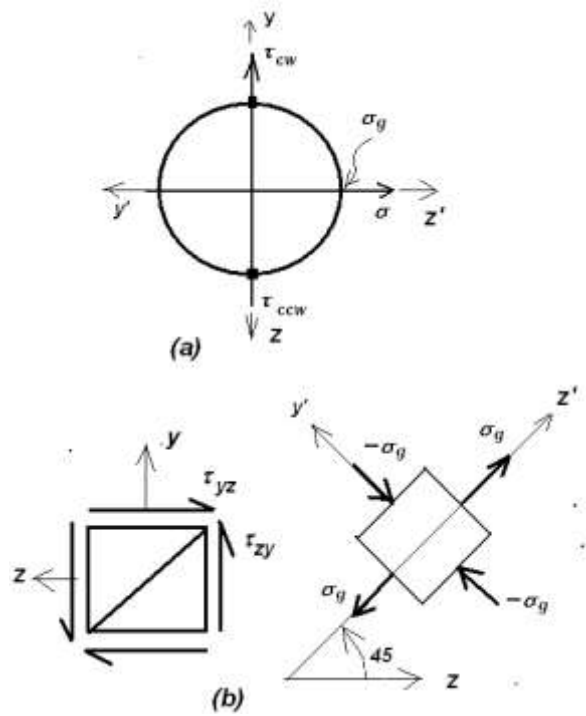
Alat Ukur dan Metode Pengukuran.

Alat ukur dibutuhkan untuk mengukur distribusi tegangan geser tangensial pada lapisan adesif. Sensor yang digunakan adalah *strain gauge* dengan ukuran panjang 2 mm. Agar bekerja dengan optimal, sensor ini dipasang searah dengan tegangan prinsipal yang terjadi.

Untuk spesimen yang mendapat beban puntir seperti yang terlihat pada Gambar 13(a), tegangan geser yang terjadi pada sebuah elemen kecil lapisan adesif adalah seperti yang terlihat pada Gambar 13(b). Gambar 13(c) memperlihatkan posisi *strain gauge* yang dipasang miring 45° pada diagonal bidang yz .



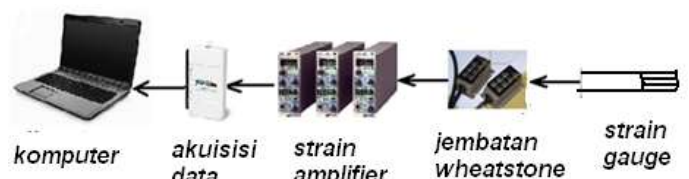
Gambar 13(a) Posisi pemasangan alat ukur di sepanjang lapisan adesif.
(b) Keadaan tegangan pada lapisan adesif
(c) Posisi pemasangan *strain gauge*



Gambar 14 (a) diagram Lingkaran Mohr
(b) tegangan principal pada posisi 45°

Dengan bantuan diagram lingkaran Mohr seperti yang terlihat pada Gambar 14(a) dapat diketahui bahwa tegangan prinsipal terjadi searah sumbu- z' , sebagai mana yang terlihat pada Gambar 14(b). Berdasarkan diagram lingkaran Mohr juga diketahui bahwa besarnya tegangan prinsipal yang terukur (σ_g) sama dengan tegangan geser tangensial τ_{xy} .

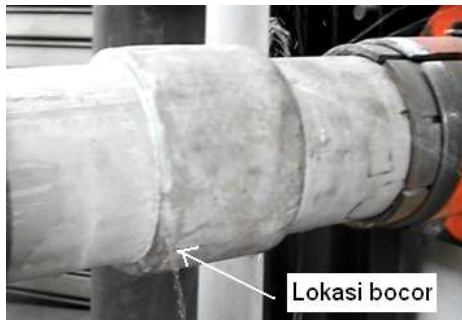
Tegangan diketahui berdasarkan potensial listrik yang terukur oleh sensor *strain gauge*. Untuk mengetahui regangan yang terjadi, sensor dilengkapi dengan alat-alat: *jembatan wheatstone*, *strain amplifier*, alat akuisisi data dan komputer. Alat-alat tersebut dipasang seperti skema yang diperlihatkan Gambar 15.



Gambar 15 Peralatan akuisisi data

Uji Tekanan Internal untuk Spesimen Tanpa Modifikasi

Pengujian terhadap beban tekanan internal dilakukan terhadap tiga buah spesimen yang diberi nama spesimen p-1, p-2 dan p-3. Masing-masing spesimen diberi tekanan dengan seperangkat pompa hidrolik. Pompa ini juga dilengkapi dengan alat ukur (*pressure gauge*). Gambar 16 memperlihatkan foto pengujian tekanan internal dan kebocoran yang terjadi.



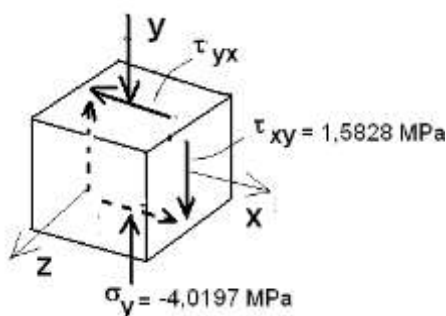
Gambar 16 pengujian tekanan internal Kebocoran pada spesimen p-1 saat

Analisis Tegangan

Berikut ini adalah prosedur analisis yang dilakukan dengan mengambil contoh pada spesimen p-1. Pengujian dilakukan dengan memberikan tekanan internal secara bertahap dan spesimen mengalami kebocoran pada tekanan $p_r = 430$ psi (≈ 3 MPa). Analisis kegagalan dilakukan dengan menghitung tegangan yang terjadi pada lapisan adesif berdasarkan analisis numerik yang dilakukan.

Diasumsikan bahwa kegagalan dimulai dari bagian tengah sambungan ($x/L=0$). Analisis dilakukan dengan metode numerik dan menghasilkan tegangan normal dan tegangan geser sebesar

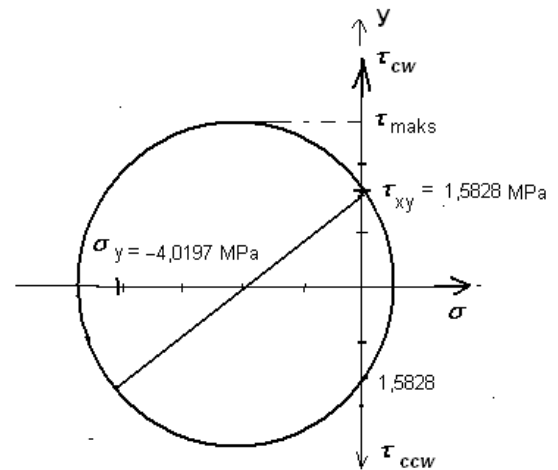
$$\begin{aligned} \sigma_y &= -1,3399 \times 3 \text{ MPa} \\ &= -4,0197 \text{ MPa} \\ \tau_{xy} &= 0,5276 \times 3 \text{ MPa} \\ &= 1,5828 \text{ MPa} \end{aligned}$$



Gambar 17 Keadaan tegangan pada elemen kecil untuk p-1

Diagram lingkaran Mohr untuk keadaan tegangan ini diperlihatkan pada Gambar 18 dan tegangan geser maksimum dapat dihitung dengan Persamaan (2) dan didapatkan tegangan geser maksimum sebesar 2,558 MPa.

$$\tau_{maks} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2)$$

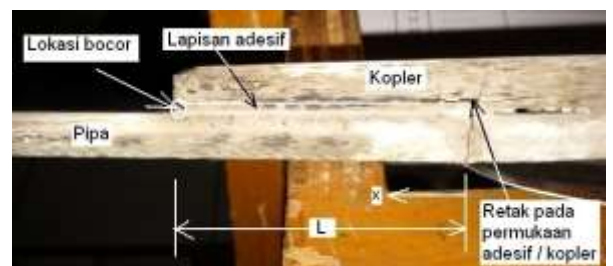


Gambar 18 Diagram lingkaran Mohr untuk tegangan pada spesimen p-1

Untuk spesimen p-2 dan p-3 juga dilakukan analisis dengan cara dan prosedur yang sama, sebagaimana yang dilakukan pada analisis spesimen p-1. Tabel 1 memperlihatkan rangkuman analisis untuk masing-masing spesimen dengan beban tekanan internal. Bentuk kegagalan masing-masing spesimen ditampilkan pada Gambar 19, Gambar 20 dan Gambar 21.

Tabel 1 Keadaan tegangan pada masing-masing spesimen

Spe	Tek.Int'nal	Peel	Teg.	Teg.	Ket.
-si	psi (MPa)	Stress	Geser	geser	
me		(MPa)	(MPa)	maks./	
n		(IV-1)	(IV-2)	prinsi	
				pal	
				(MPa)	
p-1	$\approx 440(3,00)$	-4,0197	1,5828	2,558	Bocor
p-2	$\approx 600(4,14)$	-5,5470	2,1840	5,960	Bocor
p-3	$\approx 520(3,59)$	-4,8102	1,8941	3,893	Bocor



Gambar 19 Mode kegagalan spesimen p-1 yang mendapat beban tekanan internal.



Gambar 20 Mode kegagalan spesimen p-2 yang mendapat beban tekanan internal.



Gambar 21 Mode kegagalan spesimen p-3 yang mendapat beban tekanan internal.

Analisis dan Diskusi

Dari tiga spesimen yang diuji, semua spesimen mengalami kebocoran pada tekanan internal yang berbeda-beda. Secara umum kebocoran terjadi ketika tegangan geser lebih rendah dari kekuatan geser material adesif. Tabel 2 memperlihatkan rasio tegangan geser dengan kekuatan geser saat terjadi kebocoran.

Tabel 2 Rasio tegangan geser dengan kekuatan geser adesif saat terjadi kebocoran

Spesimen	Tek.Int'nal psi (MPa)	Teg.Ge ser Prinsip al τ_{maks} (MPa)	Kekuatan geser adesif, S_{ges} (MPa)	Rasio $\tau_{maks}/$ S_{ges}
p-1	≈440(3,00)	2,558	13	19,65 %
p-2	≈600(4,14)	5,960	13	45,85 %
p-3	≈520(3,59)	3,893	13	29,95 %

Rendahnya rasio tegangan geser dengan kekuatan geser material saat terjadi kebocoran menunjukkan bahwa kegagalan sambungan tidak bisa diprediksi hanya dengan analisis tegangan (*stress analysis*). Rendahnya rasio tegangan tersebut mengindikasikan ada faktor lain yang lebih dominan dalam mekanisme terjadinya kebocoran. Sebagai hipotesa, parameter tersebut adalah rendahnya kekuatan ikat permukaan material adesif dengan permukaan pipa / kopler (*adhesive bonding strength*). Kekuatan ikat adesif bisa lebih

rendah dari kekuatan material adesif sendiri (*cohesive bonding strength*). Argumen ini didasarkan kepada analisis kegagalan terhadap foto yang ditampilkan pada Gambar 19, 20 dan 21. Semua foto menunjukkan bahwa kegagalan terjadi berupa pemisahan di batas permukaan adesif dan pipa / kopler (*adhesive failure mode*).

Uji Tekanan Internal Model Sambungan Tirus-Dalam

Pengujian terhadap tiga spesimen model tirus dalam, dua spesimen (spesimen TD-2 dan TD-3) mampu menahan tekanan internal sampai 700 psi (≈4,8 MPa, yaitu batas maksimum alat uji). Gambar 23 memperlihatkan foto penampang untuk spesimen TD-2. Hanya satu spesimen (spesimen TD-1) yang mengalami kebocoran pada tekanan ≈400 psi (≈2.76 MPa). Kebocoran pada spesimen TD-1 terjadi karena kualitas produkasinya yang rendah, terlihat adanya porositas-porositas dari penampang potongannya.



Gambar 23 Penampang potongan model sambungan tirus-dalam (TD-2)

Kesimpulan

Dari studi karakteristik yang telah dilakukan, diketahui terjadinya konsentrasi tegangan di pinggir sambungan adesif jika sambungan tersebut mendapat tekanan internal. Konsentrasi tegangan tersebut dipengaruhi oleh beberapa parameter. Dua parameter yang berpengaruh signifikan terhadap distribusi dan konsentrasi tegangan adalah ketebalan adesif dan rasio elastisitas adesif dengan elastisitas pipa. Oleh sebab itu, dalam rancangan baru yang diusulkan pada penelitian ini, perhatian lebih difokuskan kepada kedua parameter tersebut. Salah satu rancangan baru yang dimaksud adalah model tirus dalam.

Studi eksperimental yang dilakukan untuk mengamati kegagalan pada model tanpa modifikasi menunjukkan bahwa kegagalan didahului dengan terjadinya kebocoran, jika diberi tekanan internal. Kebocoran tersebut terjadi pada tegangan geser adesif yang lebih rendah dari pada kekuatan gesernya. Pada makalah ini dikemukakan dugaan bahwa kebocoran tersebut terjadi karena kekuatan ikat secara adesif (*adhesive bonding strength*) lebih rendah daripada kekuatan adesif itu sendiri (*cohesive bonding strength*). Dari tiga spesimen yang diuji, semuanya mengalami kegagalan pada permukaan batas antara material adesif dengan material pipa/kopler (*adhesive failure mode*).

Untuk model tirus-dalam, analisis numerik dan eksperimen telah membuktikan adanya peningkatan kapasitas sambungan terhadap tekanan internal jika dibandingkan dengan model tanpa modifikasi.

Saran

Saran yang diberikan dikelompokkan menjadi dua kategori, yaitu saran untuk penyempurnaan penelitian berikutnya dan saran untuk pemakaian di lapangan. Penelitian ini masih menyisakan berbagai kelemahan yang diharapkan bisa disempurnakan pada penelitian selanjutnya. Pada kajian pustaka dan analisis numerik, penelitian bisa diperluas dengan membahas teori mikro/makro mekanik pada struktur komposit dan pengaruhnya terhadap karakteristik sambungan adesif.

Pada studi eksperimental, penelitian ini juga bisa disempurnakan dengan menyiapkan spesimen yang lebih baik, sehingga kegagalan yang terjadi bukanlah disebabkan oleh ketidak sempurnaan pembuatan, tetapi bisa mengungkap kerusakan yang berhubungan dengan perilaku struktur komposit. Dengan spesimen yang standar diharapkan akan terlihat pola kegagalan misalnya: *damage*, retak atau putus serat yang menggambarkan kegagalan struktur komposit. Penyempurnaan ini bisa dilakukan dengan observasi non-destruktif (misalnya: tomografi) terhadap spesimen sebelum dilakukan pengujian.

Pada analisis kekuatan yang dilakukan, disamping melakukan analisis tegangan, penelitian selanjutnya disarankan untuk menguji pengaruh parameter-parameter lain. Parameter-parameter tersebut diantaranya kekuatan ikat pada batas permukaan adesif dengan permukaan pipa (*adhesive bonded strength*). Saran ini didasarkan pada hasil uji tekanan, dimana sambungan bocor pada batas permukaan tersebut (*adhesive failure mode*). *Envelope* kegagalan σ - τ (*bi-axial*) pipa komposit terlebih dahulu bisa dipetakan dengan teori yang ada yang kemudian dibandingkan dengan hasil pengujian eksperimental.

Untuk menggambarkan perilaku adesif yang mendapat tegangan geser, peneliti selanjutnya disarankan memakai metode pengujian lain, misalnya *double/single lap joint*. Metode ini diyakini lebih mendekati karakteristik sambungan adesif karena akan mengungkap apakah sambungan gagal secara adesif atau secara kohesif. Metode uji puntir yang telah dilakukan pada penelitian ini memiliki kelemahan tidak bisa mengungkap fenomena kegagalan secara adesif. Kajian terhadap karakteristik adesif juga bisa

diperluas dengan pendekatan lain, misalnya tinjauan sifat fisik dan sifat kimianya.

Saran untuk aplikasi di lapangan hendaklah dilakukan penyambungan dengan ketelitian yang tinggi, sehingga tidak ada cacat-cacat yang akan memunculkan porositas. Peningkatan kualitas pengerjaan bisa dilakukan, misalnya dengan menggunakan *jig* dan *fixrure* yang sesuai sehingga akan menjamin *reproductability*-nya. Selain itu juga perlu dilakukan observasi *non-destruktive* untuk memastikan kualitas sambungan yang baik sebelum digunakan.

Daftar Pustaka

1. G.P. Zou dan F. Taheri, Stress analysis of adhesively bonded sandwich pipe joints subjected to torsional loading, International Journal of Solids and Structures, 43, 5953–5968, 2006.
2. J. Cheng dan G. Li, Stress analyses of a smart composite pipe joint integrated with piezoelectric composite layers under torsion loading, International Journal of Solids and Structures 45, 1153–1178, 2008.
3. P. Mertiny & F. Ellyin, Joining of FRP Tubes for High Pressure Applications. POLYMER COMPOSITES, 99-109, 2006.
4. J. Akmal, IGN W. Puja, S. S. Brodjonegoro, R. Suratman, I. W. Suweca: “Perancangan dan Optimasi Sambungan Adesif untuk Pipa Komposit yang Mendapat Beban Torsi” , Prosiding Seminar Nasional KRTM UNS Solo, 13-14 Okt. 2009, ISBN 978-602-95597-0-5, hal. 136-143
5. T. Vallee, J.R. Correia & T. Keller, (2010), Optimum thickness of joints made of GFPR pultruded adherends and polyurethane adhesive, Composite Structures 92 (2010) hal. 2102–2108