

## Characterization of Devcon Plastic Steel Adhesive on Mild Carbon Steel

Viktor Malau

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, UGM

Hadromi

Program Studi Teknik Mesin, Universitas Negeri Semarang

### Abstract

*The objective of this research is to characterize mechanical and physical behaviors of adhesives bonding (butt and lap joints) on mild carbon steel. The research used an adhesive material of devcon plastic steel. Mechanical properties are tensile strength, shear strength and toughness of the joints.*

*The major parameters of this research were adherends surface roughness  $R_a$ , adhesive thickness, curing time and curing temperature. Surface roughness of the carbon steel adherends are  $R_a = 0,52 \mu\text{m}$ ,  $0,76 \mu\text{m}$  and  $1,21 \mu\text{m}$ . Adhesive thickness vary from: 0,03 mm to 0,3 mm and curing time: 1, 2, 3, 4 hours at curing temperatures: 55, 70, 85, 100, 120 and 140 °C. The research has been conducted under static loads at room temperature.*

*The results of static loads (tensile and shear loads) show that adhesive thickness and adherends surface roughness influence significantly the strength and toughness of the joints. An increase in the adherends surface roughness will increase adhesive strengths. For certain surface roughness, the joints have an optimum adhesive thickness that produces a strength and toughness maximum. Heat treatment of the joints at curing temperature for certain curing time influences significantly shear stresses. An increase of curing time will increase shear stresses. At certain surface roughness and curing time (for example:  $R_a = 0,76 \mu\text{m}$  and curing time = 4 hours), this research shows that the joints have an optimum curing temperature. Specimens cured at elevated temperature show generally the increasing strength, however there is an optimum temperature where cure exceed this temperature the strength begins decrease. Adhesives bonding failure of butt joints are generally cohesive and lap joints have a mixed failure cohesive and adhesive.*

**Keywords:** *adhesive bonding, mild carbon steel, devcon plastic steel, static load, butt joints.*

### PENDAHULUAN

Penggunaan sambungan adesif pada suatu konstruksi berkembang dengan pesat sejalan dengan kemajuan teknologi dewasa ini. Sambungan ini banyak ditemukan pada industri otomotif, industri pesawat terbang dan industri elektronika. Sambungan ini dapat lebih menguntungkan dari jenis sambungan lainnya seperti: mur-baut, paku keling karena konsentrasi tegangan pada elemen-elemen yang disambung lebih rendah, distribusi tegangan dapat lebih homogen dan membutuhkan ruangan lebih kecil.

Sambungan adesif terhindar dari tegangan sisa yang dapat menimbulkan pengaruh buruk terhadap konstruksi dan hal ini menguntungkan bila dibandingkan dengan sambungan las dan solder.

Yang menjadi masalah dengan sambungan adesif ini adalah: apakah sifat-sifat mekanis sambungan ini dapat bersaing atau bahkan melebihi sifat-sifat sambungan-sambungan lainnya? Kekuatan sambungan adesif akan tergantung pada jenis bahan yang disambung, jenis bahan adesifnya, kekasaran permukaan dan geometri dari benda kerja.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sifat-sifat bahan adesif dan sambungan adesif antara dua potong pelat baja karbon dengan bahan adesif yang mendapat beban statis. Sifat-sifat tersebut meliputi: kekuatan tarik, kekuatan geser, ketangguhan, kekasaran permukaan dan struktur mikro sambungan. Sambungan yang digunakan adalah tipe berimpit (*lap joints*) dan tipe bilah (*butt joints*).

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberi sumbangan pemikiran bagi perkembangan mekanika sambungan adesif terhadap beban statis dan dinamis. Hasil tersebut dapat dimanfaatkan sebagai acuan dalam perancangan suatu konstruksi yang menggunakan sambungan adesif.

### Tinjauan pustaka

Kekuatan sambungan adesif tergantung pada jenis bahan yang disambung (*adherend*), jenis adesif, kekasaran permukaan dan geometri bahan *adherend* dan jenis beban (statis atau dinamis). Hasil penelitian Tsai dkk (1995) terhadap sambungan adesif *lap-joint* dari *graphite/epoxy Redux 308A* menunjukkan bahwa sambungan terdeformasi secara non-linier setelah mendapat beban tarik statis.

Penelitian Ikagemi dkk (1996) terhadap sambungan adesif *lap-joint* dan *butt-joint* dari baja lunak/*epoxy* dengan benda uji berupa batang *cantilever ganda (double cantilever beam)* memperlihatkan bahwa bahan adesif yang kuat (*tough*) tidak senantiasa menghasilkan kekuatan (*strength*) sambungan yang lebih tinggi dari bahan adesif yang kurang kuat. Dan untuk mendapatkan kekuatan optimum dari sambungan diperlukan pengendalian suhu lapisan adesif.

Fernando dkk (1996) mengemukakan bahwa kekuatan sambungan adesif *tapered-double cantilever beam* dari aluminium paduan/*epoxy AF-163-2M* yang diperoleh lewat uji kelelahan dipengaruhi oleh suhu kerja dan lingkungan kerja (*fluida / gas*).

Perhitungan analitis dengan metode elemen hingga (*finite element*) yang telah dilakukan oleh Pradhan dkk (1995) menunjukkan bahwa kekuatan sambungan berimpit (*lap joint*) tergantung

pada 3 (tiga) parameter yaitu perbandingan (*ratio*) antara tebal *adherend* dan tebal adesif ( $r_t$ ), perbandingan antara modulus elastis *adherend* dan adesif ( $r_E$ ) dan perbandingan antara panjang *adherend* dan adesif ( $r_L$ ). Bila harga  $r_E$  dan  $r_L$  kecil dan sebaliknya  $r_t$  tinggi, maka diperoleh sambungan yang kuat. Dan panjang retak kritis yang terdapat pada sambungan tidak tergantung pada modulus elastis bahan pelat yang digunakan.

Crithlow and Brews (1995) yang telah meneliti pengaruh kekasaran permukaan *adherend* terhadap kelelahan sambungan adesif aluminium – epoxy menunjukkan bahwa kekasaran permukaan berpengaruh cukup signifikan terhadap umur sambungan.

### Metode dan Alat Penelitian

Penelitian dibagi atas dua tahap pengujian. Pengujian tahap pertama dilakukan terhadap bahan dasar sambungan. Bahan dasar tersebut berupa bahan adesif "*devcon plastic steel*" dan baja karbon rendah. Hal ini dimaksudkan untuk mendapatkan sifat-sifat awal bahan yang akan disambung. Pengujian tahap kedua dilaksanakan terhadap sambungan yang terdiri dari potongan-potongan lembaran pelat baja dengan media penyambung berupa bahan adesif.

Benda uji dari bahan adesif diperoleh dengan cara mencetak bahan tersebut menurut bentuk dan ukuran sesuai standard pengujian. Benda uji untuk bahan dasar dari baja karbon rendah diperoleh dengan cara memotong-motong pelat baja utuh sesuai dengan arah pengerolan yang dilakukan oleh pabrik penghasil pelat baja tersebut. Pemotongan dengan arah seragam ini bertujuan untuk memperoleh data pengujian yang setara. Pemotongan awal benda uji dilakukan dengan mesin gergaji untuk mencegah timbulnya efek-efek pemanasan lokal. Pengerjaan akhir benda uji (untuk mendapatkan bentuk dan ukuran sesuai dengan standard pengujian) dilakukan dengan mesin spesial. Metode atau cara pengujian yang dilakukan terhadap spesimen meliputi uji: pengujian tarik, pengujian geser, pengujian *impact*, pengujian kekerasan dan pengujian metalografi.



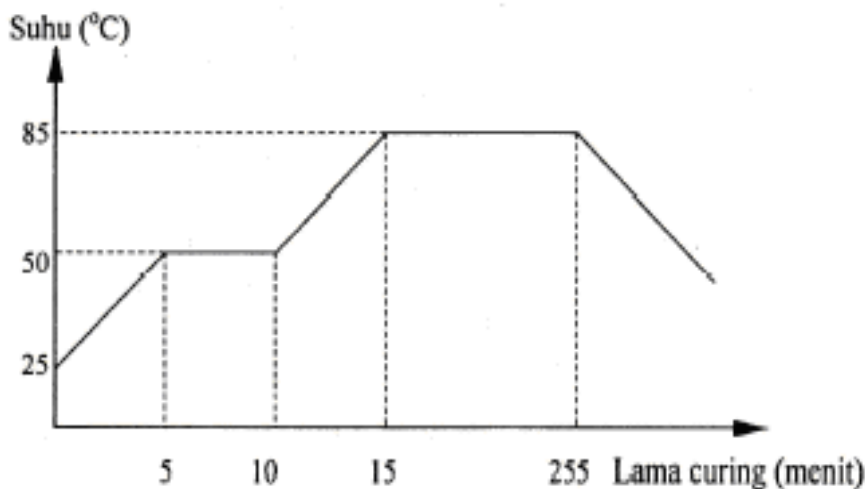
### Kekasaran permukaan adherend

Pembuatan kekasaran permukaan ( $R_a$ ) dapat dilakukan dengan cara *chemical milling* atau *cara mekanis*. Pada penelitian ini, kekasaran permukaan adherend dibuat dengan cara mekanis yaitu dengan bantuan kertas amplas. Penggunaan kertas amplas ini dimaksudkan untuk menghindari kontaminasi permukaan adherend dengan zat-zat kimia sehingga bahan adesif dapat melekat lebih baik. Kekasaran permukaan dengan kertas amplas tidak merusak bahan adherend dan adherend masih dapat digunakan untuk aplikasi berikutnya. Pertama-tama permukaan spesimen dihaluskan dengan kertas amplas No. 600, kemudian permukaan tersebut diampas lagi dengan kertas amplas No. 120, 220, dan 320 untuk memperoleh kekasaran permukaan yang bervariasi. Arah

pengamplasan dilakukan pada arah tegak lurus dengan arah beban pengujian.

Tebal lapisan adesif dikontrol dengan menggunakan serat kabel. Serat kabel berdiameter: 0,04 mm; 0,05 mm; 0,06 mm; 0,08 mm; 0,10 mm; 0,15 mm; 0,20 mm; 0,25 mm dan 0,30 mm.

Setelah sambungan adesif selesai dibuat, sambungan perlu mendapat pengeringan (*curing*) agar diperoleh kekuatan sambungan yang optimum. Salah satu proses *curing* yang dilakukan diperlihatkan oleh kurva seperti pada Gambar 1. Kedua pelat yang akan disambung dengan bahan adesif terlebih dahulu dipanaskan pada suhu  $50^\circ\text{C}$  selama 5 menit agar diperoleh kualitas yang baik dari sambungan. Proses *curing* dilakukan pada suhu  $85^\circ\text{C}$  selama 240 menit.



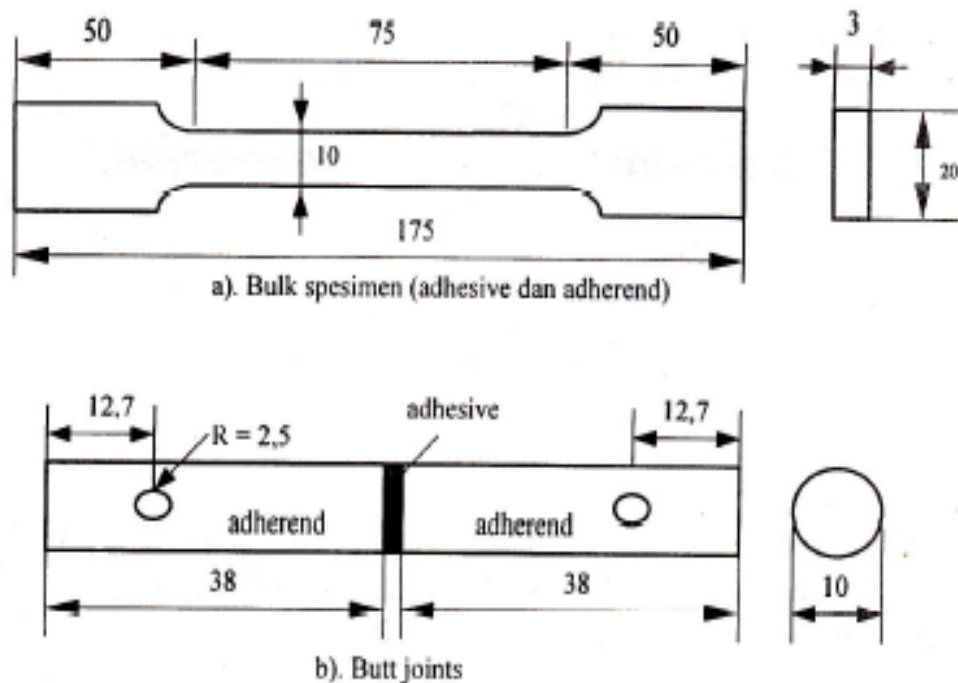
Gambar 1: Proses *curing* pada sambungan adesif

### Pengujian tarik

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan bahan yang meliputi: tegangan luluh, tegangan maksimum, tegangan patah dan modulus elastis benda uji. Harga kekuatan luluh, kekuatan maksimum, kekuatan patah dan modulus elastis tersebut dihitung berdasarkan grafik beban vs regangan spesimen yang ditarik sampai patah. Tegangan luluh didefinisikan sebagai tegangan awal yang akan menghasilkan deformasi permanen benda uji.

Dari definisi ini, kekuatan luluh dapat ditentukan dengan mengamati grafik yang menunjukkan adanya deformasi permanen yaitu

daerah setelah batas elastis bahan. Pada daerah ini terdapat pertambahan regangan yang tidak stabil dengan bertambahnya beban tarik. Harga kekuatan tarik maksimum dihitung berdasarkan pada beban maksimum yang dapat ditahan oleh bahan tersebut. Gambar 2 memperlihatkan bentuk benda uji tarik sesuai standard JIS K6849.



Gambar 2: Spesimen uji tarik (JIS K6849)

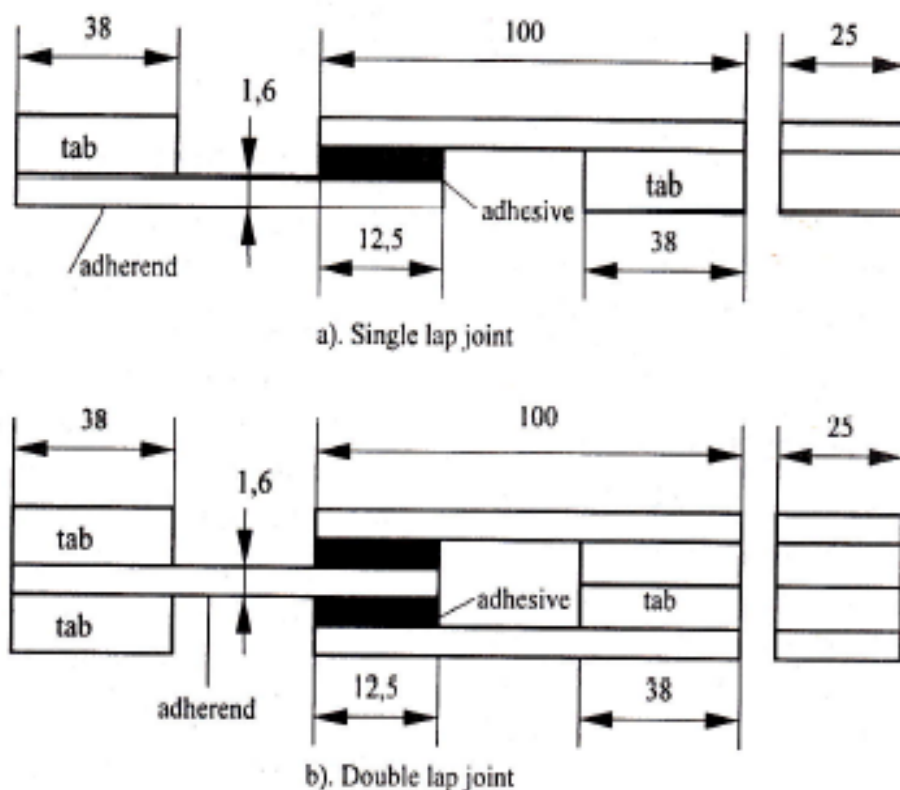
### Pengujian geser

Uji geser ini dimaksudkan untuk memperkirakan tegangan geser spesimen. Pada pengujian ini digunakan spesimen berupa sambungan adesif tipe berimpit (*single lap joints*) dengan ukuran sesuai standard JIS K6850 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

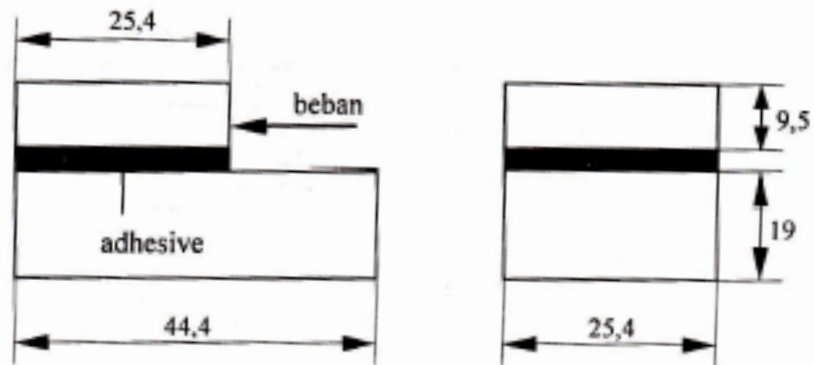
Parameter pengujian geser sambungan meliputi: tebal lapisan adesif, kekasaran permukaan ( $R_a$ ), suhu dan lama *curing*.

### Pengujian impact

Pengujian *impact* spesimen dimaksudkan untuk mengetahui ketangguhan bahan. Alat uji yang digunakan berupa *Impact Charpy Machine* yang dilengkapi dengan alat pemukul berupa palu dengan bentuk, ukuran dan berat tertentu. Alat ini dapat menunjukkan tenaga patah yang diperlukan untuk mematahkan spesimen dengan luas penampang tertentu dengan sekali pukul saja.



Gambar 3: Spesimen uji geser (JIS K6850)



Gambar 4: Spesimen impak sambungan (ASTM 950-54)

Sambungan adesif berbentuk persegi-panjang dengan ukuran menurut standard ASTM 950-54 diperlihatkan pada Gambar 4.

$$\text{Ketangguhan bahan } K = \frac{\text{Tenaga patah}}{\text{Luas penampang patah}}$$

Parameter pengujian ketangguhan sambungan meliputi: tebal lapisan adesif dan kekasaran permukaan ( $R_a$ ) pada suhu dan lama *curing* konstan ( $85^\circ\text{C}$ , 240 menit).

#### Uji metalografi

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui struktur mikro spesimen. Penampang benda uji atau sambungan dihaluskan dengan kertas amplas dari nomor 200, 400, 600, 800, dan 1000 secara berturut-turut dengan bantuan mesin *polishing table unit* dan kemudian dipoles. Pada proses pemolesan digunakan bahan poles sebagai media abrasifnya. Langkah ini bertujuan untuk mengkilapkan permukaan uji agar selama pengamatan dapat diperoleh pantulan sinar yang baik. Selain itu, selama langkah pemolesan ini diharapkan bahwa partikel abrasif kertas amplas dari proses penghalusan sebelumnya dapat hilang. Pemolesan dilakukan dengan mesin *polishing table unit* dengan *autosol* sebagai bahan poles.

Setelah penampang uji terhindar dari goresan-goresan, penampang tersebut dietsa dengan larutan etsa dalam jangka waktu tertentu. Selama proses etsa, bahan etsa akan bereaksi dan melarutkan bagian-bagian tertentu dari struktur logam sehingga struktur-struktur tersebut dapat dibedakan dengan jelas satu dengan yang lain. Setelah proses etsa selesai, lalu spesimen dicuci dengan aquades untuk menetralkan bahan etsa.

Kemudian struktur mikro diamati dan diambil gambarnya dengan mikroskop optik.

#### Benda uji

Benda atau materi utama yang diteliti merupakan potongan-potongan pelat baja karbon rendah yang disambung dengan bahan adesif *devcon plastic steel*. Spesimen pengujian berupa sambungan adesif tipe *butt-joint* untuk uji tarik, tipe berimpit (*single lap joint*) untuk uji geser, tipe berimpit *single lap joint* untuk uji ketangguhan bahan.

#### Alat penelitian

- Mesin servopulzer: Mesin ini digunakan sebagai alat uji tarik, untuk mengetahui kekuatan tarik, kekuatan geser spesimen. Spesifikasi mesin servopulzer adalah sbb:  
Merk : Shimadzu  
Controller : Model 4825  
Function generator: Sinus, segitiga, segiempat  
 $f = 0,001$  sampai 110 Hz  
Kapasitas : 20 ton
- Alat uji kekerasan Shore dan Micro-Vickers: Untuk mengetahui kekerasan permukaan spesimen (bahan dasar dari pelat baja karbon dan sambungan adesif).
- Mikroskop optik: Untuk pengamatan metalografi (struktur mikro) penampang sambungan dan untuk pengambilan gambar (photo) penampang yang diamati
- Mesin *roughness* tester: Mesin ini digunakan untuk mengukur kekasaran permukaan benda uji.

- e. *Oven*: Untuk proses curing pada spesimen
- f. *Valve spring tester*: Sebagai alat bantu dalam proses pembuatan kekasaran permukaan adherend.
- g. *Jig* dan *fixture*, jangka sorong dan kertas amplas dll.

## Hasil dan Pembahasan

### Sifat mekanis bahan dasar

Hasil pengujian terhadap bahan dasar dari baja karbon rendah dan bahan adesif yang digunakan diperlihatkan pada tabel di bawah ini. Pengukuran kekasaran permukaan adherend

dilakukan dengan *tracing length* 4 mm, *vertical magnification* 2000 X dan *horizontal magnification* 20 X. Kekasaran permukaan yang diperoleh untuk tiga jenis/seri kertas amplas adalah sebagai berikut:

- a. Kertas amplas No. 120  
⇒  $Ra = 1,21 \mu\text{m}$
- b. Kertas amplas No. 220  
⇒  $Ra = 0,76 \mu\text{m}$
- c. Kertas amplas No. 320  
⇒  $Ra = 0,52 \mu\text{m}$ .

Sifat-sifat baja karbon rendah dan bahan adesif devcon

Sifat-sifat	Bahan	
	Baja karbon	<i>Devcon plastic steel</i>
Tegangan tarik $\sigma_u$ (kg/mm <sup>2</sup> )	50,5	2,27
Tegangan luluh $\sigma_y$ (kg/mm <sup>2</sup> )	35,7	1,5
Tegangan patah $\sigma_b$ (kg/mm <sup>2</sup> )	45,8	2,27
Kekerasan Shore	60	45
Modulus elastis (GPa)	199	5,9
Ketangguhan (J/mm <sup>2</sup> )	0,3375	0,0375

### Sambungan *butt-joint*

Data hasil pengujian spesimen *butt-joint* diperlihatkan pada Gambar 5. Hasil ini menunjukkan bahwa bila  $Ra$  adherend naik maka kekuatan tarik sambungan akan meningkat. Kenaikan  $Ra$  akan menyebabkan luas bidang kontak permukaan antara adherend dan bahan adesif semakin besar sehingga kekuatan tarik sambungan meningkat. Tebal lapisan adesif berpengaruh cukup signifikan terhadap kekuatan tarik sambungan *butt-joints*.

Gambar 5 memperlihatkan adanya tebal lapisan optimum dari bahan adesif untuk mendapatkan kekuatan tarik maksimum dari sambungan *butt-joints*. Patahan yang terjadi pada sambungan dapat berupa patahan interfisial, patahan kombinasi (interfasial dan kohesif adesif) dan patahan kohesif adesif seperti ditunjukkan pada Gambar 6.

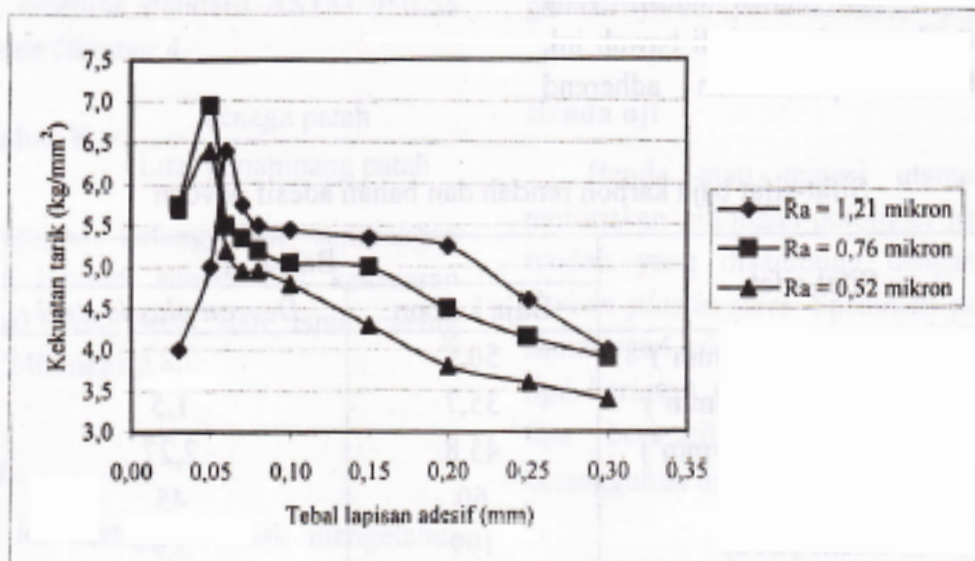
### Sambungan berimpit

Kekuatan geser sambungan berimpit antara *single lap joint* dan *double lap joint* memberi harga yang hampir sama. Kekuatan geser sebagai fungsi tebal lapisan adesif untuk sambungan *single lap joint* diperlihatkan pada Gambar 7. Sama halnya dengan sambungan *butt-joint*, pada sambungan ini didapatkan juga tebal lapisan optimum dari bahan adesif yang memberikan kekuatan maksimum sambungan. Patahan yang terjadi pada sambungan berimpit kebanyakan jenis patahan kohesif dan sebagian kecil jenis patahan kombinasi kohesif dan interfisial. Bila  $Ra$  semakin kecil maka patahan yang terjadi cenderung mengarah pada jenis gabungan kohesif dan interfisial.

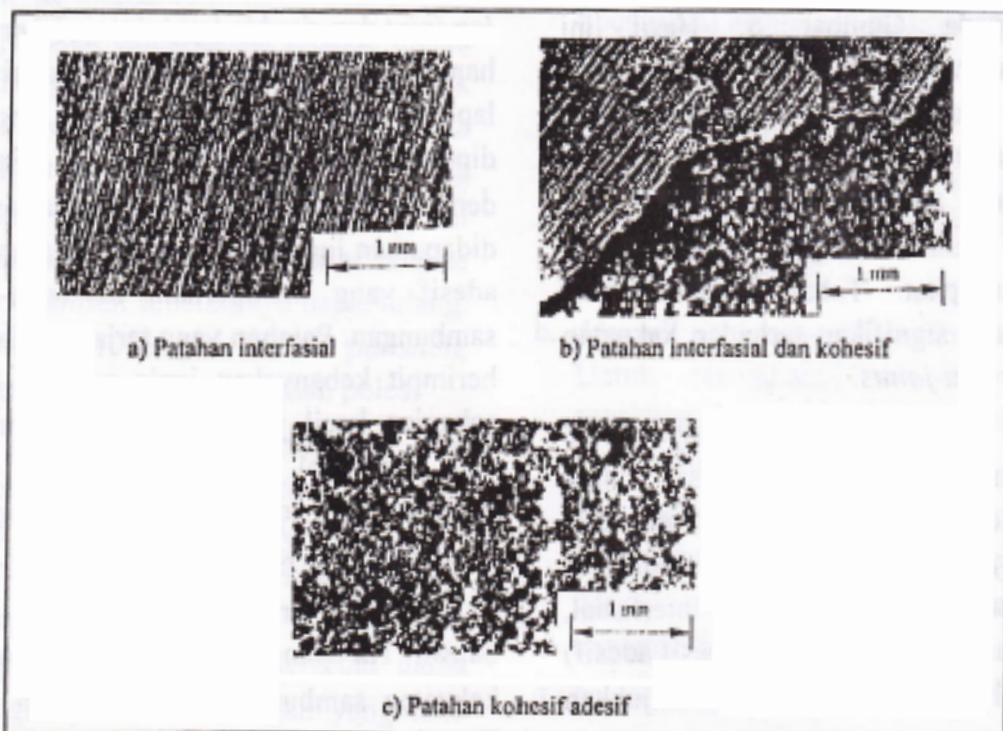
Berdasarkan hasil penelitian ini terlihat bahwa  $Ra$  yang semakin besar menghasilkan kekuatan sambungan yang semakin tinggi pula. Tetapi penelitian Crithlow dan Brews (1995) menunjukkan bahwa permukaan yang lebih kasar

memberikan kekuatan sambungan yang lebih lemah setelah perendaman spesimen dalam air deionisasi pada suhu 60 °C selama 211 hari. Kondisi ini dapat terjadi akibat kemungkinan adanya udara / gas terjebak pada celah sambungan (kondisi ini membuat sambungan menjadi tidak homogen) dengan demikian bahan adesif tidak dapat menempel secara sempurna pada permukaan adherend sehingga kekuatan sambungan berkurang. Gambar 6 memperlihatkan adanya tebal lapisan optimum dari bahan adesif

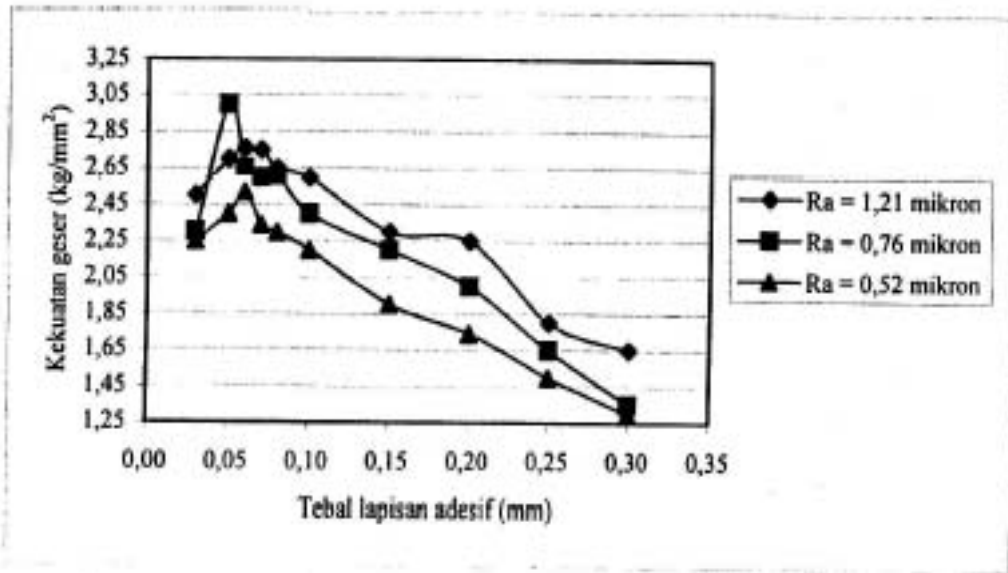
untuk mendapatkan kekuatan geser maksimum dari sambungan berimpit. Gambar 8 dan Gambar 9 memperlihatkan pengaruh suhu dan lama *curing* terhadap kekuatan geser sambungan berimpit untuk  $Ra = 0,76 \mu\text{m}$ . Bila lama *curing* meningkat maka kekuatan geser sambungan naik. Kekuatan geser maksimum dicapai pada saat suhu *curing* optimum yang tergantung pada lama *curing* yang dilakukan.



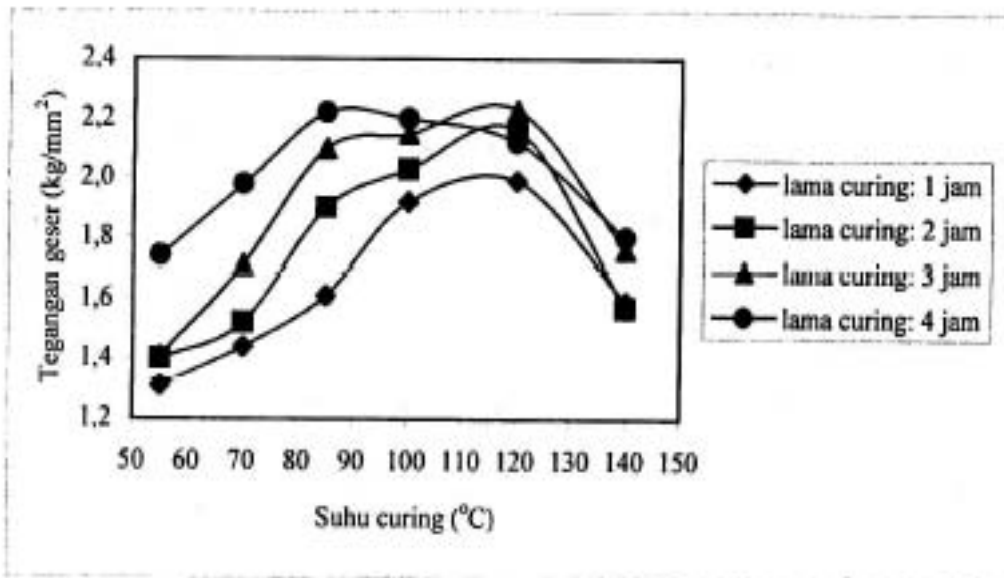
Gambar 5: Kekuatan tarik vs tebal lapisan dan Ra pada sambungan *butt-joint*. (suhu *curing* 85 °C, lama *curing* 4 jam)



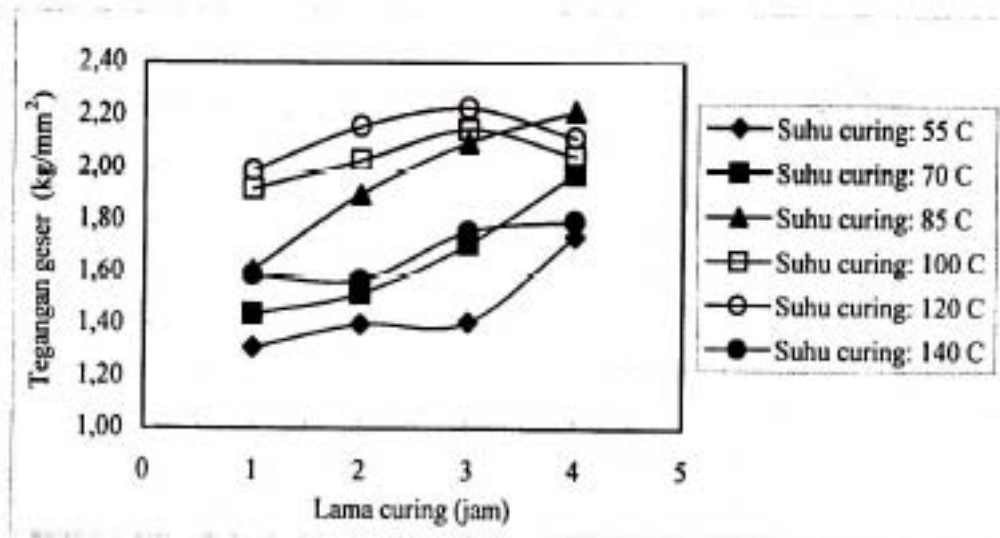
Gambar 6: Tipe / jenis patahan pada sambungan



Gambar 7: Kekuatan geser vs tebal lapisan sambungan berimpit (suhu dan lama curing: 85 °C, 4 jam)



Gambar 8: Kekuatan geser vs suhu dan lama curing sambungan berimpit (Ra = 0,76 μm)



Gambar 9: Kekuatan geser vs lama dan suhu curing sambungan berimpit (Ra = 0,76 μm)

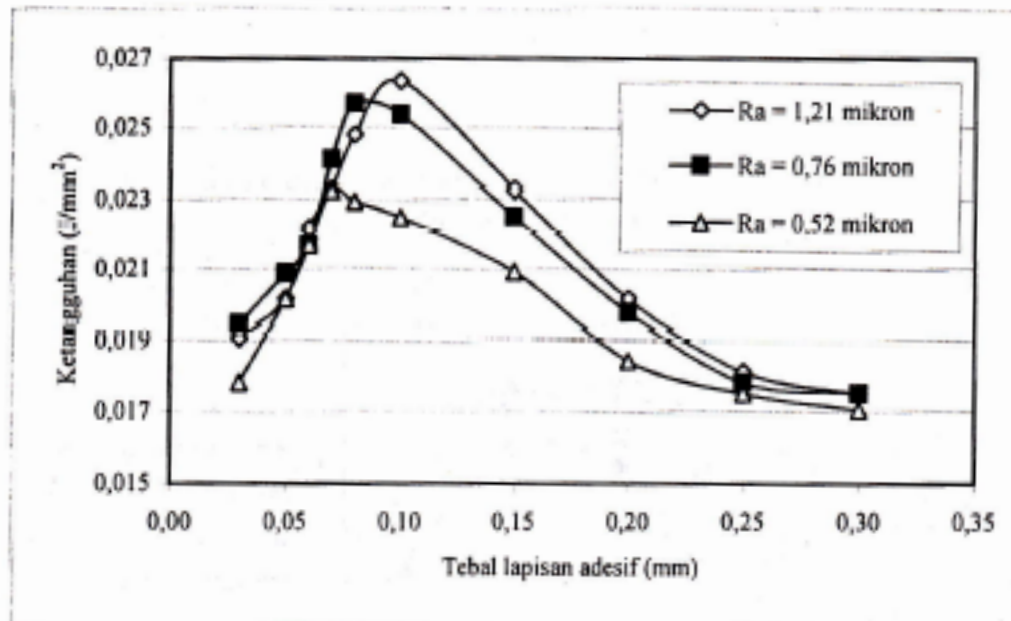


Berdasarkan Gambar 9 di atas dapat dilihat bahwa suhu *curing* yang relatif tinggi (misalnya: 140°C) justru menghasilkan kekuatan geser yang menurun.

### Ketangguhan sambungan

Hasil pengujian ketangguhan (Gambar 10) memperlihatkan bahwa harga  $R_a$  cukup

berpengaruh terhadap ketangguhan sambungan. Tebal lapisan bahan adesif mempunyai pengaruh cukup besar juga terhadap ketangguhan sambungan. Ketangguhan maksimum dari sambungan terjadi pada ketebalan tertentu (optimum). Patahan yang terjadi didominasi oleh jenis kohesif dan bila harga  $R_a$  semakin kecil, maka patahan akan didominasi oleh jenis patahan gabungan antara kohesif dan interfasial.



Gambar 10: Ketangguhan vs tebal lapisan sambungan berimpit

### Kesimpulan dan Saran

#### Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah diperoleh di muka, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Tebal lapisan adesif, kekasaran permukaan adherend mempengaruhi kekuatan tarik, kekuatan geser dan ketangguhan sambungan. Bila kekasaran permukaan adherend naik, maka kekuatan tarik, geser dan ketangguhan dari sambungan akan meningkat. Tebal lapisan adesif yang terlalu besar atau terlalu kecil akan menurunkan kekuatan sambungan. Dalam hal ini, kekasaran permukaan tertentu menghasilkan suatu tebal lapisan optimum yang memberi kekuatan maksimum.
2. Lama dan suhu *curing* juga berpengaruh terhadap kekuatan geser sambungan. Kenaikan lama *curing* akan menghasilkan peningkatan kekuatan geser sambungan. Demikian juga

dengan suhu *curing*, kenaikan suhu ini sampai batas tertentu akan meningkatkan kekuatan geser. Kekasaran permukaan dan lama *curing* tertentu memberikan suhu *curing* optimum yang menghasilkan kekuatan geser maksimum.

3. Kegagalan yang terjadi pada sambungan *butt-joint* adalah jenis patahan kohesif dari adesif, sedang pada sambungan berimpit (*lap joint*) adalah kombinasi patahan kohesif dan interfasial (kohesif lebih dominan).

#### Saran

1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk menentukan kekasaran optimum dari adherend agar diperoleh kekuatan maksimum dari sambungan.
2. Perlu dilakukan penelitian lanjutan tentang pengaruh suhu dan lama *curing* terhadap kekuatan sambungan pada berbagai suhu kerja dan kelembaban.

### Ucapan Terimakasih

Penelitian ini dapat terlaksana atas kerjasama dengan Direktorat Pembinaan Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat (sebagai penyanggah dana), Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi dan Lembaga Penelitian Universitas Gadjah Mada. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada Direktorat Pembinaan Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat yang telah membiayai penelitian ini dan juga kepada Lembaga Penelitian UGM yang telah menjembatani kerjasama ini sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

### Daftar Pustaka

- Crithlow, G.W., Brewis, D.M., 1995, Influence of Surface Macroroughness on Durability of Epoxide-Aluminium Joints. *Int. J. Adhesion and Adhesives*, Vol. 25, No. 3, 173-178.
- Devcon ITW (978) 777-1100, 2000, Quick Curing Epoxies Bond a Range of Material, *Modern Machine Shop April 2000*, pp. 18-22.
- Fernando, M., Harjoprayitno, W.W., Kinloch, A.J., 1996, A Fracture Mechanics Study of the Influence of Moisture on the Fatigue Behavior of Adhesively Bonded Aluminium-Alloy Joints, *Int. J. Adhesion and Adhesives*, 16, 113-119.
- Ikagami, K., Fuji, T., Kawagoe, H., Motoie, K., Nohno, K., Sugibayashi, T., Yoshida, F., 1996, Benchmark Test on Adhesive Strengths in Butt, Single and Double Lap Joints and Double-Cantilever Beams, *Int. J. Adhesion and Adhesives*, 16, 219-226.
- Pradhan, S.C., Iyengar, N.G.R., Kishore, N.N., 1995, Finite Element Analysis of Crack Growth in Adhesively Bonded Joints, *Int. J. Adhesion and Adhesives*, 15, 33-41.
- Shields, J., 1970, *Adhesives Handbooks*, First Edition, 355, CRC., Great Britain, pp. 19-22.
- Tsai, M.Y., Morton, J., Matthews, F.L., 1995, Experimental and Numerical Studies of a Laminated Composite Single-Lap Adhesive Joint, *J. of Composite Materials*, 29, 1254-1275.