

## KEKUATAN *BENDING* KOMPOSIT SANDWICH SERAT GELAS DENGAN *CORE DIVINYCELL-PVC H-60* (PENGARUH ORIENTASI SERAT, JUMLAH LAMINAT DAN TEBAL *CORE* TERHADAP KEKUATAN *BENDING*)

Kuncoro Diharjo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Staf Pengajar – Jurusan Teknik Mesin – Universitas Sebelas Maret

### **Keywords :**

*Bending strength*  
*GFRP*  
*Sandwich composite*  
*Divinycell-PVC core*

### **Abstract :**

*This study aims to investigate the effect of fiber orientation to bending strength of GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic) composite and the effect of laminates number and core thickness to bending properties of GFRP sandwich composite with divinycell-PVC core type H-60. The composites were produced by using a press mold method for 40% of fiber volume fraction (vf). The GFRP composite specimen consists of 4 laminates – woven roving glass fiber, varied by fiber orientation as [(0/90)4], [(30/-60)/(60/-30)]2, [(45/-45)4], [(30/-60)/(0/90)]2, and [(45/-45)/(0/90)]2). The GFRP composite whose the highest bending strength was used as skin of the sandwich composite. The variables of the sandwich are laminates number (2L, 4L, 6L, 8L) and core thickness (5, 10, 15, 20 mm). According to ASTM D-790 and ASTM C-393, the GFRP and sandwich composite specimens were tested by using three point bending method. The result shows that the GFRP composite, reinforced by [(0/90)4] of fiber orientation, has the highest bending strength (226.62 MPa) compared to others, and it's failure is dominated by interlaminar delamination. For GFRP sandwich composite with 10 mm of core thickness, the maximum moment capacity increases a long with the increasing of laminates number. However, the highest bending strength is achieved on the sandwich composite with 4 laminates of glass fiber. All specimens shows core shear failure model. And then, for sandwich composite with skin 4 laminates, the increasing of core thickness also increases moment capacity consistently, but it decreases the bending strength significantly. Similarly, the decreasing of core shear strength also happens on the specimen. On the specimen occurs core shear and indentation of failure types.*

### **PENDAHULUAN**

Saat ini, komposit polimer telah digunakan di berbagai bidang dan telah mampu menggantikan bahan konvensional logam dan kayu (Haydaruzzaman et. al., 2010). Pasar komposit terbesar adalah transportasi 31% dan konstruksi 19,7%, kapal 12,4%, peralatan elektronik 9,9%, pemakai langsung 5,8%, serta peralatan bisnis yang memiliki pasar luas. Pasar komposit untuk pesawat terbang dan ruang angkasa hanya 0,8%, khususnya komposit yang sangat ringan dan mahal. Pada tahun 2004, konsumsi komposit di USA meningkat drastis hingga 4 milyar *pounds*, sedangkan konsumsi komposit di Eropa dan Jepang masing-masing sebesar 3 dan 2 milyar *pounds* (Farahani, 2010).

Keuntungan utama penggunaan komposit polimer adalah kekuatan dan kekakuannya tinggi, densitasnya rendah, tahan korosi, umur lelah panjang, dan mudah dibentuk. Selain itu, komposit polimer ini juga memiliki koefisien gesek yang rendah serta mampu melumasi sendiri sehingga berpeluang untuk digunakan sebagai *seals*, bantalan,

roda gigi, dan sambungan kaki palsu (Suresha et. al., 2010).

Komposit *sandwich*, yang strukturnya tersusun dari dua lembar komposit *skin* dan *core* (inti) di bagian tengahnya, telah digunakan lebih luas, antara lain pada pesawat terbang, kapal, mobil, kincir angin, lokomotif, dan bangunan, serta produk industri mutu tinggi lainnya. Komposit ini memiliki sifat kekakuan tinggi, ringan, isolasi termal dan redaman bising tinggi, mudah di-*machining*, dan mudah dibentuk (Wang et. al., 2010).

Di Indonesia, contoh aplikasi komposit *sandwich* GFRP adalah untuk pembuatan *car body Rail Bus* di PT-INKA Madiun dan pembuatan pintu rumah di PT-Induro International Tangerang. *Core* yang sudah digunakan adalah *polyurethane foam* dan *divinycell PVC*. Di negara maju, komposit serat grafit-epoksi juga digunakan untuk balok dan tiang jembatan. Penempatan lembaran polimer pada balok komposit grafit-epoksi mampu meningkatkan kapasitas beban 30-65% dan dijamin tahan untuk panjang bentangan jembatan 26 ft. Umumnya,

jembatan komposit ini digunakan sebagai jembatan sementara ketika jembatan permanennya sedang diperbaiki. Bahkan untuk transportasi aliran gas alam, pemerintah USA juga telah menggunakan pipa komposit GFRP. Dengan menggunakan resin epoksi, pipa komposit yang berdiameter 2-3 inci dapat tahan hingga tekanan lebih dari 3.500 psi dan sudah dipakai untuk pipa saluran gas alam (Ayers, 2010).

Terkait dengan prospek aplikasi komposit *sandwich* yang sudah berfungsi sebagai struktur, maka faktor-faktor yang berpengaruh terhadap kekuatan komposit *sandwich* menjadi penting untuk diteliti. Secara umum, kekuatan komposit dipengaruhi oleh jenis, geometri, orientasi, distribusi, dan kandungan serat. Menurut teori *Rule of Mixture* (ROM), kekuatan komposit meningkat seiring dengan penambahan kandungan serat hingga 60-70% (Sanadi *et. al.*, 1986). Serat sebagai penguat komposit harus memiliki panjang sekurang-kurangnya 100 kali diameter atau lebarnya untuk memperoleh penguatan yang optimal (Brady dan Clavier, 1991). Semakin kecil ukuran serat, maka perekatan dan kekuatan komposit semakin baik, karena rasio luas permukaan terhadap volumenya semakin besar.

Berdasarkan uraian di atas, maka sangatlah penting untuk dilakukan penelitian tentang kekuatan *bending* komposit *sandwich* GFRP dengan *core Divinycell PVC H-60*.

### Sifat Mekanis Komposit

Berbagai jenis material dapat digunakan sebagai *skin* pada struktur *sandwich*, seperti plat aluminium, baja, titanium dan komposit *polymer*. Kekuatan struktur *sandwich* dipengaruhi oleh sifat mekanis *skin* dan *core*, tebal *skin* dan *core*, serta kekuatan ikatan antara *skin* dengan *core*. Biasanya *skin* pada komposit *sandwich* dibuat dari tipe yang sama, akan tetapi dapat juga dibuat dari jenis yang berbeda tergantung pada persyaratan spesifik yang diperlukan. Perbedaan bisa berupa pada jenis material, ketebalan, orientasi serat, fraksi volume serat atau dalam bentuk yang lain (ASTM C 274-99, 1998).

Menurut Kowangid & Diharjo (2003), komposit *sandwich* dengan *core divinycell PVC H-200* mempunyai kekuatan *bending* 15,4 % lebih tinggi dari penggunaan *core divinycell PVC H-100*. Jadi, semakin tinggi sifat mekanis *core*, semakin tinggi pula kekuatan komposit *sandwich*.

Penambahan tebal *core* pada komposit *sandwich* GFRP tidak mampu meningkatkan kekuatan *bending*. Namun kemampuan menahan momen komposit *sandwich* akan meningkat seiring dengan penambahan tebal *core* (Sudiono & Diharjo, 2004)

### Kekuatan Bending

Pada dasarnya, kekuatan *bending* hampir sama dengan kekuatan tarik. Akibat pengujian *bending*, bagian atas spesimen mengalami tekanan dan bagian

bawahnya mengalami tarikan. Pada komposit laminat GFRP, kekuatan *bending*-nya dapat dirumuskan (ASTM D 790-99):

$$\sigma_b = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$

dengan catatan: P = beban (N), L = panjang span (mm), b = lebar (mm), d : tebal (mm).

Besarnya momen pada pengujian *three point bending* dirumuskan:

$$M = \frac{PL}{4} \quad (2)$$

Pada uji *bending* komposit *sandwich* dengan metode *midspan load (three point bending)*, besarnya kekuatan *bending* komposit *sandwich (facing bending stress)* dirumuskan (ASTM C 393):

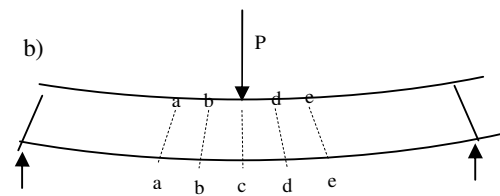
$$\sigma = \frac{PL}{2t(d+c)b} \quad (3)$$

dengan catatan d = tebal *sandwich* (mm), c = tebal *core* (mm), t = tebal *skin* (mm), L = panjang *span* (mm), b = lebar *sandwich* (mm)

Tegangan geser *core* komposit *sandwich* dirumuskan (ASTM C 393):

$$\tau = \frac{P}{(d+c) \times b} \quad (4)$$

Defleksi yang terjadi dapat diilustrasikan pada Gambar 1. Garis aa, bb, cc, dd dan ee terlihat mengalami perputaran, tetapi berkas garis tengah pusat pembebanan (cc) tetap tegak lurus terhadap sumbu pusat. Hal ini memperlihatkan bahwa bagian atas mengalami tekanan dan bagian bawah mengalami tegangan tarik.



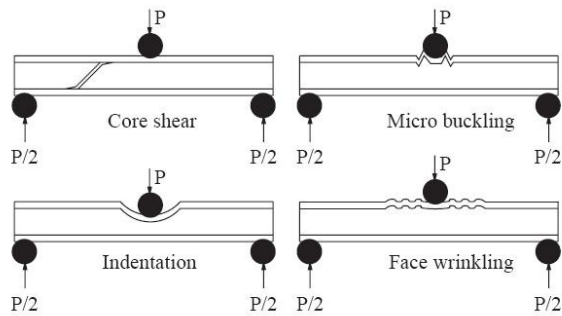
Gambar 1. Defleksi pada balok *sandwich*.

### Model Kegagalan Struktur Sandwich

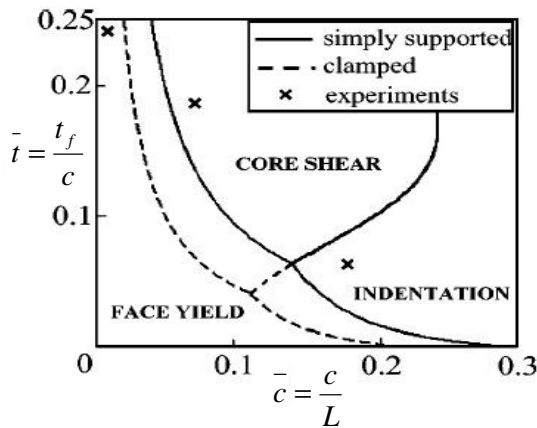
Model kegagalan komposit *sandwich* yang mengalami beban *bending (threefour point bending)* biasanya berupa *micro buckling/face yield*, *core shear*, *core crushing* dan *indentation*. Kegagalan *micro buckling* biasanya terjadi pada *skin* komposit *sandwich* yang relatif tipis terhadap tebal *core*. Kegagalan ini dapat menyebabkan penurunan kekuatan *bending* secara drastis. Perilaku gagal *core shear* biasanya terjadi pada balok *sandwich* dengan *skin* yang relatif tebal dengan *span* yang pendek. Kegagalan didominasi oleh lemahnya kekuatan *core* yang digunakan. Kegagalan *indentation* akan muncul

pada balok *sandwich* dengan *core* yang relatif tebal jika dibandingkan dengan ketebalan *skin* dan kekuatan *core* yang sangat rendah. Kegagalan ini menyebabkan defleksi yang lebih besar dibandingkan dengan model kegagalan lainnya. Kegagalan *core crushing* ditunjukkan oleh hancurnya *core* karena tidak mampu menahan beban geser sehingga kegagalan terjadi menyeluruh pada semua bagian *core* (Steeves dan Fleck, 2004).

Kerusakan panampang komposit *sandwich* sangat dipengaruhi oleh sifat mekanis *skin* dan *core*. Peta mekanisme kegagalan komposit *sandwich* ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Model kegagalan struktur *sandwich* akibat beban *bending* (Steeves dan Fleck, 2004).



$t_f$  = tebal *skin* ( $t_f$ )

Gambar 3. Peta mekanisme kegagalan balok *sandwich* akibat uji *bending* (Tagerriali dan Fleck, 2005)

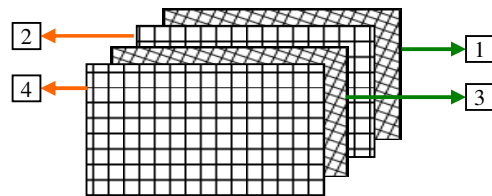
**METODE PENELITIAN**

**Material**

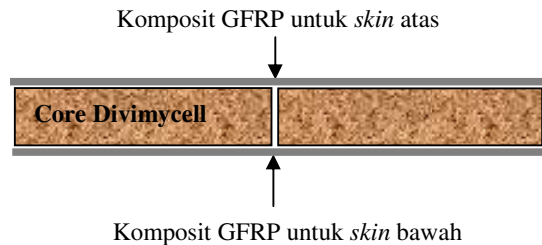
Bahan utama penelitian adalah serat gelas anyam (*woven roving*) dengan spesifikasi berat/luasan 300 gr/m<sup>2</sup>, *core divinycell-PVC H-60*, *unsaturated polyester resin* (UPRs) 157 BQTN-EX, dan *hardener* MEKPO (metil etil katon peroksida). Matrik *polyester* dipersiapkan dengan kandungan 1% *hardener* terhadap volume UPRs.

**Spesimen dan Pengujiannya**

Spesimen komposit GFRP yang tersusun dari 4 laminat serat gelas anyam dengan variasi orientasi arah serat [(0/90)<sub>4</sub>], [((30/-60)/(60/-30))<sub>2</sub>], [(45/-45)<sub>4</sub>], [((30/-60)/(0/90))<sub>2</sub>], dan [(45/-45)/(0/90))<sub>2</sub>]. Laminat yang memiliki kekuatan tertinggi akan digunakan untuk pembuatan spesimen komposit *sandwich* dengan *core divinycell-PVC H-60* setebal 10 mm. Variabel penelitiannya adalah tebal laminat (L) komposit GFRP (2L, 4L, 6L, 8L). Laminat terbaik akan digunakan pada tahap penelitian selanjutnya dengan memvariasi tebal *core* 5, 10, 15 dan 20 mm. Pembuatan komposit *skin* GFRP dan komposit *sandwich* dilakukan dengan metode cetak tekan hidrolis pada fraksi volume serat 40%.



Gambar 4. Model komposit GFRP dengan susunan laminat [((30/-60)/(0/90))<sub>2</sub>].



Gambar 5. Model spesimen komposit *sandwich*.

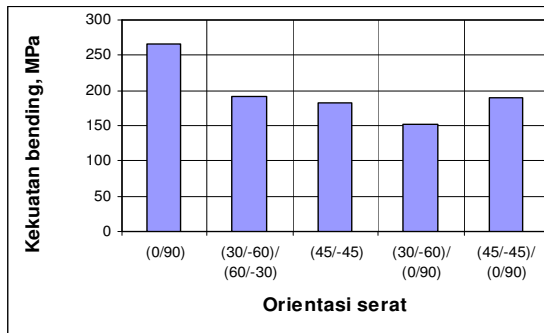
Pengujian *three point bending* dikenakan pada sampel uji komposit GFRP sesuai ASTM D-790 dan sampel uji komposit *sandwich* sesuai ASTM C-393-94. Data hasil pengujian ini adalah beban maksimum dan defleksi spesimen. Untuk mengeliminasi faktor ketebalan pada analisis hasil uji komposit *sandwich* dilakukan dengan memberikan faktor pembagi ketebalan *skin* dan *core*.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

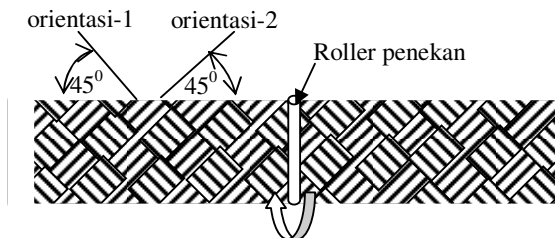
**Pengaruh Orientasi Serat**

Secara teoritis, jika lamina serat 0/90 mampu menahan tegangan sebesar  $\sigma$  (serat orientasi 90 dianggap tidak menahan tegangan), maka lamina serat 45/45 mampu menahan tegangan sebesar  $\sigma/\sqrt{2}$  dan lamina serat 30/-60 mampu tegangan beban  $\frac{\sigma(1+\sqrt{3})}{2}$ . Analisis tersebut di atas menunjukkan bahwa lamina serat dengan orientasi 45/-45 dan 30/-60 memiliki tegangan yang lebih besar dari lamina serat dengan orientasi 0/90. Namun hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan *bending* komposit

GFRP dengan orientasi serat  $[(0/90)_4]$  memiliki tegangan *bending* terbesar (266,62 Mpa) dibandingkan dengan komposit dengan orientasi serat yang lain  $[(30/-60)/(60/-30)_2]$ ,  $[(45/-45)_4]$ ,  $[(30/-60)/(0/90)_2]$ , dan  $[(45/-45)/(0/90)_2]$ , seperti Gambar 6. Rendahnya kekuatan *bending* pada komposit lamina dengan orientasi  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  dan  $45^\circ$  disebabkan lemahnya daerah yang mentransferkan tegangan (beban) dari serat-matrik-serat, khususnya di sepanjang roller penekan beban. Jadi, lokasi sampel uji yang paling lemah berada pada daerah transfer tegangan yang seratnya diskontinyu (Gambar 7).

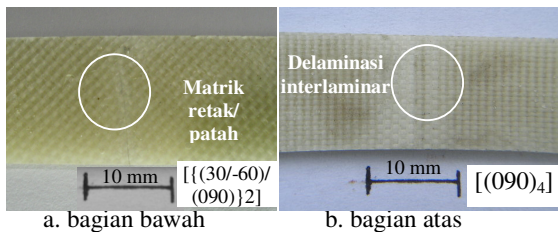


Gambar 6. Kekuatan *bending* komposit GFRP.



Daerah kritis transfer tegangan dari serat - matrik - serat

Gambar 7. Analisis ilustrasi transfer beban.



Gambar 8. Penampang kegagalan *bending* komposit *skin* GFRP.

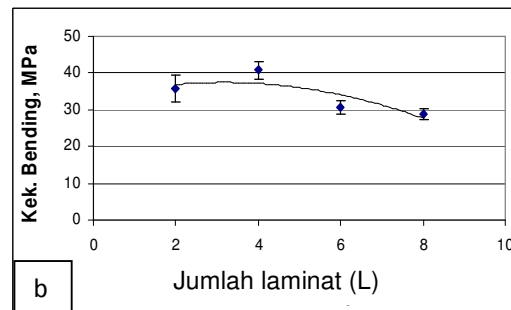
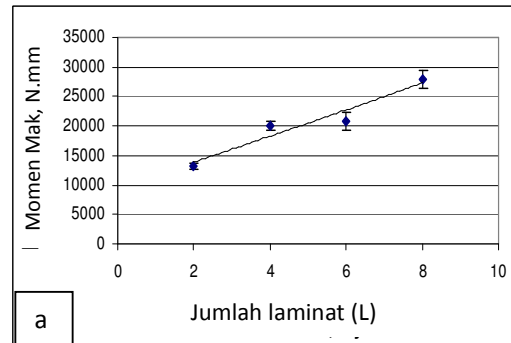
Penampang patahan pada komposit *skin* dengan orientasi 0/90 menunjukkan kegagalan delaminasi antar lamina (Gambar 8), yang disebabkan oleh perbedaan elongasi kontinyu antara lamina sisi atas dan bawah. Khusus pada komposit *skin* dengan orientasi 30/60, kegagalan yang terjadi adalah kegagalan matrik (Gambar 8). Hal ini terjadi karena

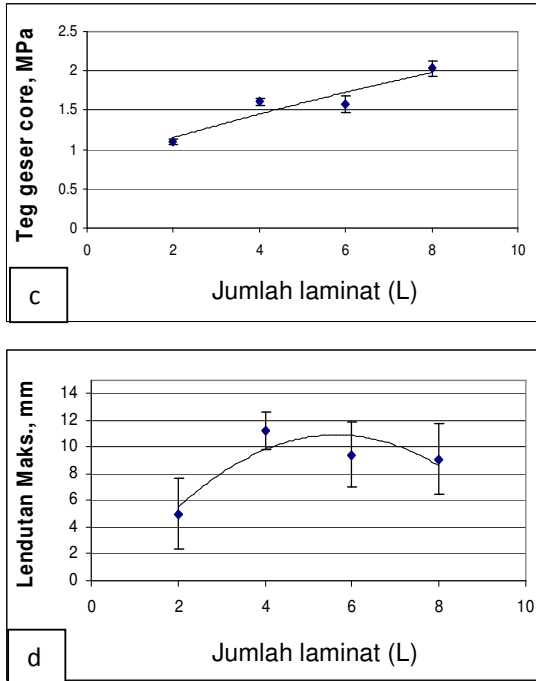
adanya elongasi yang diikuti oleh pelepasan ikatan serat diskontinyu oleh matrik.

### Pengaruh Jumlah Laminat Terhadap Kekuatan Bending Komposit Sandwich

Dengan memberikan variasi jumlah laminat (2L, 4L, 6L, 8L) pada komposit *sandwich* GFRP 0/90 dengan *core divinycell PVC H-60*, besarnya momen *bending* maksimum yang mampu ditahan meningkat secara konsisten seiring dengan penambahan jumlah laminat (Gambar 9a). Hal ini dipengaruhi oleh peningkatan kapasitas beban bagian *skin* yang sekaligus meningkatkan momen inersia komposit *skin* dan struktur komposit *sandwich* secara keseluruhan.

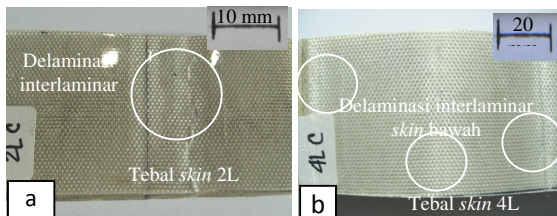
Sehubungan dengan adanya kesamaan komposit *skin* di bagian terluar, semestinya komposit ini memiliki kekuatan *bending* maksimum yang sama pula karena kekuatannya tergantung pada permukaan panel bagian bawah yang menderita tegangan tarik tertinggi. Namun hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kekuatan *bending* tertinggi terjadi pada komposit *sandwich* dengan *skin* 4L, yaitu 40,72 MPa (14,13 % lebih tinggi dari kekuatan *bending* komposit *sandwich* dengan *skin* 2 laminat). Pada komposit *sandwich* dengan *skin* 6L dan 8L, kekuatan *bending*nya mengalami penurunan sebesar 14,49 % dan 19,01 % dari kekuatan *bending* komposit *sandwich* dengan 2L (Gambar 9b). Fenomena ini menunjukkan bahwa ada kesesuaian dimensi antara tebal *skin* dan tebal *core* pada struktur komposit *sandwich* yang dipengaruhi oleh sifat mekanis *skin* dan *core*.



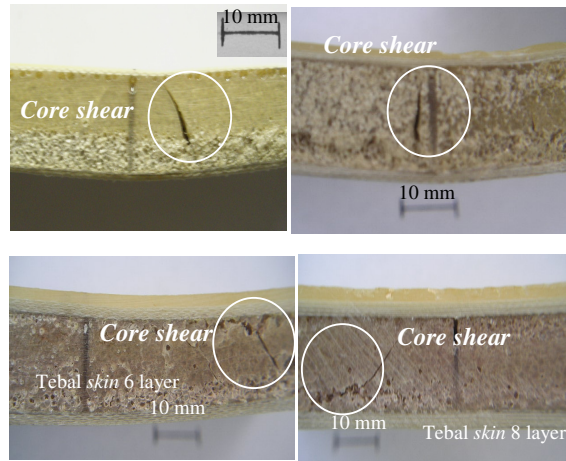


9. Kurva hasil uji bending komposit sandwich dengan variasi jumlah laminat.

Pada komposit sandwich dengan tebal skin 2 laminat yang tipis, kegagalan ditunjukkan oleh adanya delaminasi antar laminat pada skin bagian atas. Hal ini mengindikasikan jenis kegagalan indentasi sebagai karena core tidak mampu menerima beban tekan yang terkonsentrasi. Untuk komposit dengan skin 4 laminat, skin mengalami delaminasi interlamina pada skin sisi bawah. Khusus pada komposit yang memiliki skin 6 dan 8 laminat, kegagalan geser core tampak lebih nyata. Hasil analisis ini memiliki relevansi dengan teori kegagalan yang disampaikan oleh Steeves dan Fleck, (2004). Namun demikian, kegagalan geser tampak terjadi pada semua komposit sandwich (Gambar 9c dan Gambar 11). Jadi komposit ini masih dapat ditingkatkan kekuatannya dengan menggunakan core yang memiliki sifat mekanis lebih tinggi.



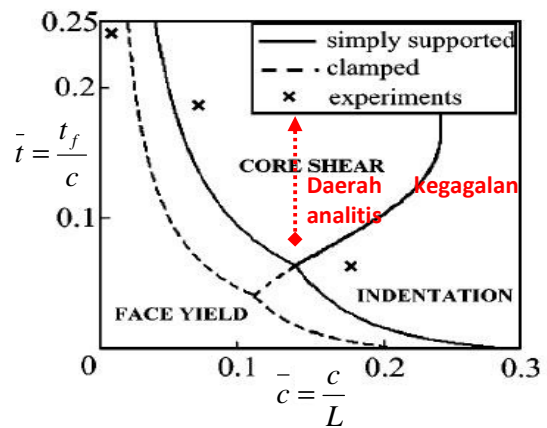
Gambar 10. Kegagalan uji bending komposit sandwich skin 2L dan 4L (a) skin atas dan (b) skin bawah.



Gambar 11. Kegagalan uji bending komposit sandwich variasi jumlah laminat.

Lendutan tetinggi juga terjadi pada komposit yang memiliki kekuatan bending tertinggi, yaitu komposit sandwich dengan skin 4 laminat (Gambar 9d). Kurva lendutan ini memiliki korelasi yang sangat kuat dengan kurva kekuatan bending; dimana kekuatan tertinggi struktur sandwich juga dicapai dengan ketahanan defleksi yang tertinggi. Dengan demikian, komposit sandwich dengan skin 4 laminat dan core divinycell PVC H-60 10 mm merupakan struktur sandwich yang paling optimum.

Berdasarkan peta kegagalan oleh Tagerriali dan Fleck (2005), hasil kegagalan sampel komposit sandwich masih berada pada daerah gagal core shear (Gambar 12).



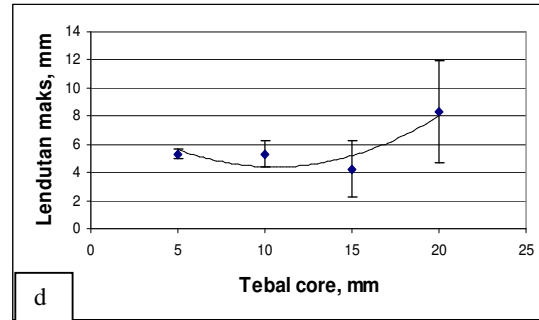
Gambar 12. Peta kegagalan komposit sandwich dengan variasi jumlah laminat menurut teori Tagerriali dan Fleck (2005).

**Pengaruh Tebal Core Terhadap Kekuatan Bending Komposit Sandwich**

Pada komposit sandwich dengan skin 4 laminat, pengaruh tebal core secara signifikan mampu

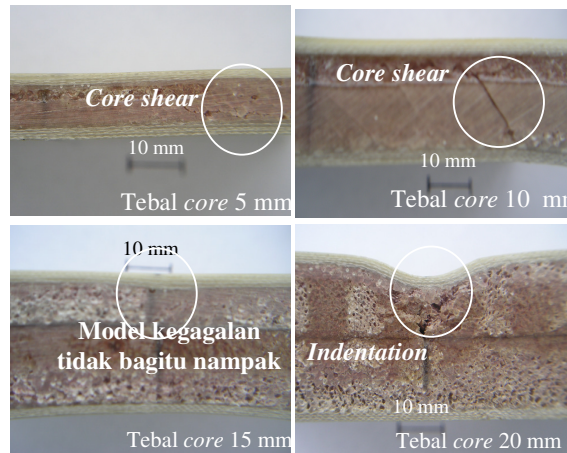
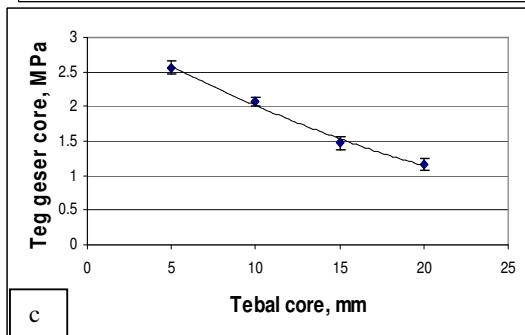
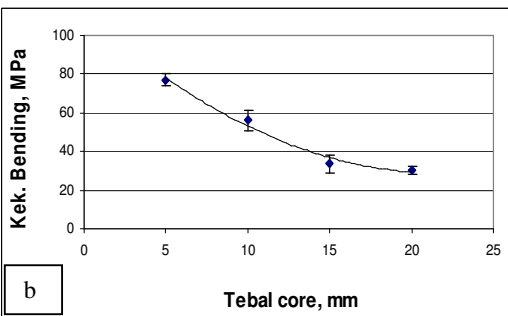
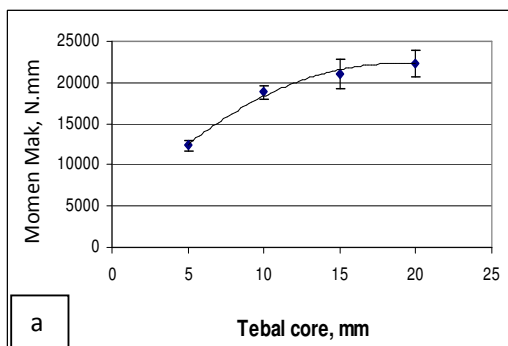
meningkatkan kapasitas momen maksimum komposit *sandwich* (Gambar 13a). Fenomena ini menguntungkan karena penebalan *core* tidak meningkatkan berat struktur yang berarti. Peningkatan momen ini dipengaruhi oleh peningkatan momen inersia (kekakuan) struktur *sandwich*.

Berdasarkan analisis kekuatan/ tegangan *bending*, peningkatan tebal *core* menyebabkan penurunan kekuatan *bending* yang signifikan (Gambar 13b). Penurunan kekuatan *bending* ini dipengaruhi oleh adanya perubahan pola kegagalan dari *core shear* menuju kegagalan indentasi (Gambar 14). Terkait dengan perubahan pola kegagalan ini, maka defleksi maksimumnya juga cenderung mengalami peningkatan karena adanya kontribusi penambahan defleksi pada kegagalan indentasi (Gambar 13d). Pada komposit *sandwich* dengan tebal *core* 5 mm, kekuatan *bending*nya adalah sebesar 77,01 MPa. Kekuatan geser *core* komposit *sandwich* juga mengalami penurunan seiring dengan peningkatan tebal *core* (Gambar 13c).

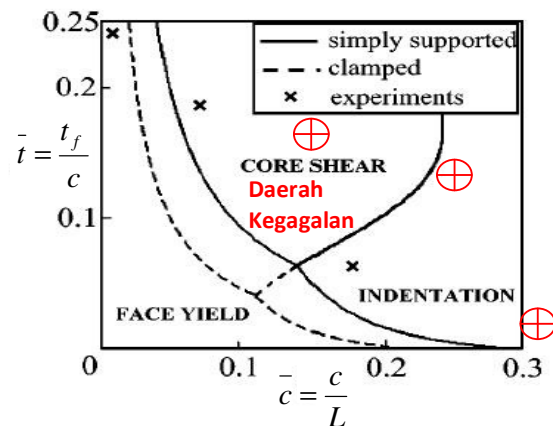


Gambar 13. Kurva hasil uji *bending* komposit *sandwich* dengan variasi tebal *core*.

Model kegagalan yang terjadi pada komposit variasi tebal *core* secara teoritis berdasarkan peta model kegagalan adalah *core shear* dan *indentation* (Gambar 14 dan Gambar 15). *Core shear* terjadi pada *sandwich* dengan tebal *core* 5 mm, dan 10 mm. Sedangkan model kegagalan indentasi terjadi pada tebal *core* 15 mm, dan 20 mm.



Gambar 14. Kegagalan uji *bending* komposit *sandwich* dengan tebal *core*.



Gambar 15. Peta kegagalan komposit *sandwich* dengan variasi tebal *core* menurut teori Taggeriali dan Fleck (2005).

## KESIMPULAN

Kekuatan *bending* komposit GFRP dengan orientasi serat [(0/90)<sub>4</sub>] memiliki tegangan *bending* terbesar (266,62 Mpa) dibandingkan dengan komposit dengan orientasi serat yang lain [(30/60)/(60/30)<sub>2</sub>], [(45/45)<sub>4</sub>], [(30/60)/(0/90)<sub>2</sub>], dan [(45/45)/(0/90)<sub>2</sub>]. Penampang patahan komposit *skin* dengan orientasi 0/90 adalah kegagalan delaminasi antar lamina. Pada komposit *skin* dengan orientasi 30/60, kegagalan yang terjadi adalah kegagalan matrik.

Dengan variasi jumlah laminat (2L, 4L, 6L, 8L) pada komposit *sandwich*, besarnya momen *bending* maksimum yang mampu ditahan meningkat secara konsisten seiring dengan penambahan jumlah laminat. Kekuatan *bending* tertinggi terjadi pada komposit *sandwich* dengan *skin* 4L. Kegagalan geser tampak terjadi pada semua komposit *sandwich*.

Pada komposit *sandwich* dengan *skin* 4L, penebalan *core* mampu meningkatkan kapasitas momen maksimum. Namun, peningkatan tebal *core* menyebabkan penurunan kekuatan *bending*-nya. Kekuatan geser *core* komposit *sandwich* juga mengalami penurunan seiring dengan peningkatan tebal *core*. Model kegagalan yang terjadi adalah *core shear* dan indentasi.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada DP2M Dikti yang telah mendanai penelitian ini melalui skim Penelitian Dosen Muda dan PT-INKA Madiun yang telah menyediakan *core divinycell PVC* dan serat gelas. Terima kasih yang mendalam juga disampaikan kepada Istanto, S.T. yang telah membantu mengerjakan penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- ASTM C 274-99, "Standard Terminology of Structural Sandwich Constructions", Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, United States.
- ASTM C 393-9, 'Standard Test Methode for Flexural Properties of Sandwich Construction', Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, United States.
- ASTM D 790-97, "Standard Test Methode for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials", Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, United States.

- Ayers C., 2010, *Uses of Composite Materials*, eHow Distributor, 26 Desember 2010.
- Brady G.S. dan Clavier H.R., 1991, *Materials Handbook*, 13<sup>th</sup> Edition, Mc-Graw Hill, London.
- Farahani A.V., 2010, *Composite Materials: Characterization*, Fabr. and Appl.-Research Challenges and Directions. Appl. Comp. Matr., 17:63–67, Springer Publishing.
- Haydaruzzaman, Khan A. H., Hossain M. A., Khan M. A., Khan R. A. dan Hakim M. A., 2010, *Fabrication and Characterization of Jute Reinforced Polypropylene Composite: Affectiveness of Coupling Agents*, J. Comp. Matr., 44(16): 1945-1963.
- Kowangid dan Diharjo K., 2003. "Karakteristik Mekanis Komposit Sandwich Serat Gelas Dengan Core PVC", Skripsi, Jurusan Teknik Mesin FT-UNS, Surakarta.
- Sanadi, A.R., Prasad, S.V., dan Rohatgi, P.K. 1986, *Sunhemp Fibre-Reinforced Polyester*, Journal of Materials Science, 21, pp. 4299-4304, UK.
- Steeves C. A., dan Fleck N.A., 2004. "Collaps Mechanism of Sandwich Beam with Composite Face and Foam Core Loaded in Three Point Bending", Available Online at www.sciencedirect.com.
- Sudiono dan Diharjo K., 2004. "Karakteristik Mekanis Komposit Sandwich Serat Glass dengan Core Foam/PU", Skripsi, Teknik Mesin FT UNS, Surakarta.
- Suresha B., Ramesh B. N., Subbaya K. M. dan Chandramohan, 2010, *Mechanical and Three-body Abrasive Wear Behavior of carbon-Epoxy Composite With and Without Graphite Filler*, J. Comp. Matr., 44(21): 2509-3015.
- Tagerielli V.L dan Fleck N. A, 2005, "A Comparison of the Structural Responce of Clamped and Simply Supported Sandwich Beams with Aluminium Face and Foam Core", Engineering Department, Uneversity of Cambridge, Trumpington Street, Cambridge, CB2 1 PZ, UK.
- Wang S. X., Wu L. Z. dan Ma L., 2010, "Indentation Study of Foam Sandwich Structures Reinforced by Fiber Columns", J. Sandwich Struct. and Matr., 12: 621-646.