

Study Sifat Ketangguhan Patahan Tarik Material Hybrid Komposit dengan Penguat Interply Serat Karbon dan Basalt

I.D.G Ary Subagia*

Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Udayana
Bukit Jimbaran Badung-Bali
arsubmt@gmail.com

Abstrak

Komposite material secara luas telah diaplikasikan pada produk teknologi, namun, sifat getas (brittle) menjadi masalah utama dalam aplikasinya. Hibridisasi dengan interply serat karbon dan serat basalt menggunakan pengikat tunggal epoxy telah dirancang dengan variasi fraksi berat serat basalt yaitu 10 wt%, 20 wt%, 30 wt%, dan 40 wt%. Proses manufaktur menggunakan proses injeksi yaitu Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) process. Kemudian sample (*Compact Tension*) sesuai standard ASTM D 5045 di potong menggunakan mesin water-jet. Tujuan penelitian adalah untuk mengamati sifat ketangguhan patahan komposit serat karbon (*Carbon Fiber Reinforced Plastics "CFRP"*), juga bertujuan menentukan nilai ketangguhan patah hibrid komposit menurut peningkatan efek dari peningkatan dan variasi posisi serat basalt pada CFRP. Metode pengujian yang diterapkan dalam penelitian ini adalah menggunakan metode uji ketangguhan patah mode I (K_{IC}). Kemudian sifat dan bentuk patahan di analisa menggunakan scanning electron mikroskop (SEM). Hasil pengujian menunjukkan meningkatnya jumlah serat basalt dilamisi pada serat karbon menunjukkan penurunan ketangguhan patah (K_{IC}). Namun perambatan retak yang ditimbulkan lebih pendek dari pada komposit serat karbon. Kemudian, sifat patahan ditunjukkan untuk hibrid komposit lebih ulet dibandingkan dengan komposit serat karbon. Selain itu juga *pull-out*, *de-bonding*, *delamination* dan *splitting* adalah gejala umum terjadi pada patahan dari hibrid komposit akibat dari tegangan sisa masing – masing serat dan matrik. Selanjutnya hybrid komposit memberikan penurunan biaya produksi. Kesimpulan ditunjukkan bahwa hibridisasi secara signifikan mempengaruhi sifat mekanis dan karakteristik ketangguhan serta keuletan komposite material.

Keywords: Hibrid komposit, kegagalan patah, serat karbon, serat basalt, ketangguhan mode I

Pendahuluan

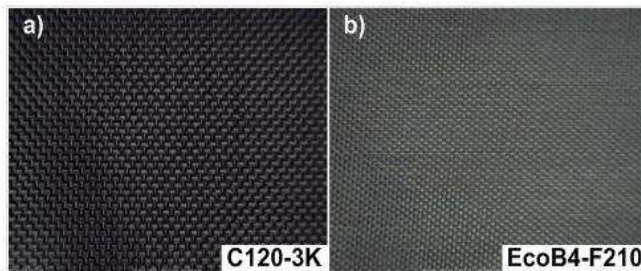
Komposit material secara significant telah dapat menggantikan peran material konvensional dalam produk teknologi, karena memiliki keunggulan dalam hal sifat mekanik (misal; kekuatan dan kekakuan spesifik tinggi) maupun sifat fisis (misalnya; tahan korosi, ringan, density rendah, koefisien muai rendah, daya hantar listrik yang rendah). (Nasmi Herlina Sari, 2011; Sudarsono, 2012) Berdasarkan keunggulan tersebut di atas, (Zhang et al., 2012), menyatakan bahwa kurang lebih 7.5% komponen kendaraan menggunakan komposit material dan berdampak pada penurunan bobot kendaraan kurang lebih 30% ~ 40% (Cramer et al., 2002). Selain itu, 20% - 35% untuk komposit serat gelas dan 40% ~ 60% untuk material komposit yang menggunakan penguat serat karbon (Al-Qureshi, 2001; Hosseinzadeh et al., 2005). Serat gelas, karbon merupakan jenis serat inorganic yang umum digunakan sebagai penguat komposit.

Banyak keunggulan ditunjukkan oleh kedua serat tersebut, baik sebagai penguat tunggal ataupun kombinasi keduanya (hybrid) (Manders et al., 1981). (Raja et al., 2013) menjelaskan bahwa hibridisasi antara serat karbon dan gelas dengan variasi sudut pelapisan 0°/90° menunjukkan peningkatan sifat tarikan (tensile properties). Serat karbon sebagai penguat komposit material memiliki tegangan tarik yang relatif tinggi yaitu kurang lebih 1180 (MPa), dan modulus elastisitas mencapai kurang lebih 72 (GPa) (Jane Maria Faulstich de Paivaa, 2006). Penelitian lain juga dilakukan oleh (Jayabal et al., 2011) menerangkan bahwa kombinasi antara serat gelas dengan serat organik telah memberikan pengaruh positif terhadap sifat tegangan tarik, tegangan bending dan tegangan impact. Sebaliknya, material komposit umumnya adalah bersifat getas (*Brittle*) yang dapat patah (*Fracture*) secara tiba-tiba tanpa informasi sebelumnya. Sedangkan, serat glass adalah beracun yang membahayakan kesehatan dan lingkungan dan serat karbon adalah sangat mahal, sehingga hanya mungkin untuk kebutuhan teknologi tinggi. Untuk perbaikan sifat

negative dari serat gelas telah diperkenalkan serat basalt (S. E. Artemenko et al., 2008).

Serat basalt adalah type serat organic yang berasal dari lahar gunung berapi dengan melalui proses peleburan (*Spinning process*) (Saravanan, 2006; Velde.K et al., 2003) pada temperature 1700°C menjadi serat (I.D.G. Ary Subagia et al., 2013). Hasil kajian yang dilakukan oleh (Singha, 2012) menunjukkan bahwa serat basalt tersusun atas unsur – unsur kimia 52.8% SiO₂, 17.5% Al₂O₃, 10.3 Fe₂O₃, 4.63% MgO, 8.59% CaO, 3.34% Na₂O, 1.46% K₂O, 1.38% TiO₂, 0.28%P₂O₅, 0.16% MnO, dan 0.06% Cr₂O₃. Selanjutnya, ditinjau dari sifat mekanik maupun fisis yang dibandingkan antara serat basalt dengan serat gelas memiliki sifat yang lebih baik sehingga memungkinkan digunakan sebagai pengganti serat gelas (S.E. Artemenko, 2003; I. M. De Rosa, 2011 ; Salvatore Carmisciano et al., 2011; Wei et al., 2011).

Berdasarkan sifat dan karakteristik tersebut, kami menguji ketangguhan patah komposit hybrid interply anyaman serat (*plain woven*) karbon dan basalt. Tujuan penelitian adalah untuk menentukan sifat dan perilaku ketangguhan patah akibat beban tarikan (*fracture toughness mode I*) dengan pengaruh fraksi berat serat basalt. Ketebalan komposit material dan perambatan retak menjadi kajian utama dari analisa ketangguhan patah dari komposit material. Disamping itu, bentuk patahan yang terjadi pada hybrid komposit setelah patah dapat dianalisa menggunakan mikroskop electron (*Scanning electron microscope “SEM”*)



Gambar 1. a. Anyaman serat karbon C120-3K b. Anyaman serat basalt EcoB4-F210

Material dan proses manufaktur

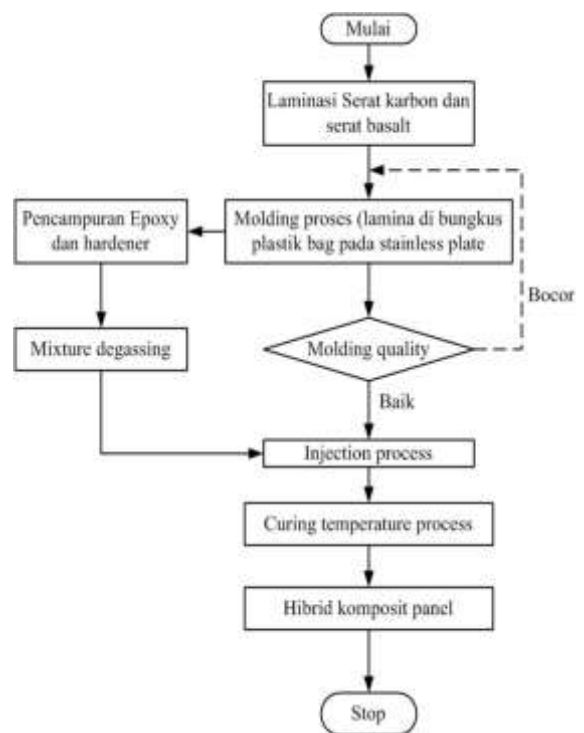
Material komposit

Dalam penelitian ini sebagai penguat dipergunakan adalah anyaman serat karbon (C120-3K, diproduksi oleh Hyundai Fiber Co. Ltd, Korea selatan) dan anyaman serat basalt (EcoB4-F210) diproduksi oleh Seco-Tech, Korea selatan) (lihat gambar 1a dan b). Kedua serat tersebut dilaminasi dan di ikat dengan matrik yaitu epoxy resin (HTC-667C, Jet-Korea Industrial Corporation, Korea selatan).

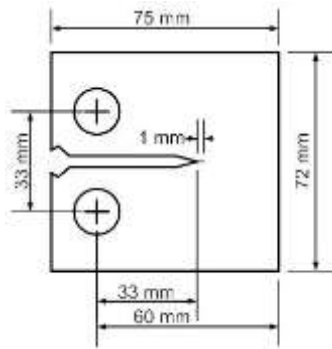
Proses manufaktur

Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (VARTM) proses dikenal sebagai satu dari sekian banyak metode untuk pembuatan komposit material sebagai pengembangan dari metode resin transfer molding (RTM) (Bender et al., 2006). VARTM dalam penelitian ini dipergunakan karena memiliki banyak keuntungan seperti rendah void, ketebalan produk merata, mampu dalam produksi material yang relative tipis, biaya produksi rendah, dsb) (Justin B. Alms, 2010). Proses VARTM diilustrasikan seperti pada gambar 2. Delapan puluh anyaman serat (*plain woven*) karbon dan serat basalt berukuran 25 cm x 25 cm, disusun pada cetakan berupa plat stainless berukuran 30 cm x 30 cm x 0.5 cm. Selanjut dibungkus dengan lembaran plastik menggunakan perekat (sealant tape). Setelah proses ini, campuran epoxy resin dan pengeras (*Hardener*) dengan rasio 5:1 terlebih dahulu di degassing selama kurang lebih 40 menit. Selanjutnya, dengan menggunakan pompa vakum bertekanan sekitar -80 (KPa), epoxy resin dipompakan ke dalam cetakan. Kemudian, akhir dari proses cetakan di cure pada oven, selama kurang lebih 2 jam dengan temperatur konstan sebesar 65°C.

Kompak tension spesimen (CT) dipotong dari komposit panel menggunakan mesin water-jet, dengan celah retakan lurus (30°) sesuai standard (ASTMD-5045, 2007). Spesimen uji ketangguhan patahan tarik merupakan kombinasi interply serat karbon dan serat basalt dengan variasi berat fraksi serat basalt (yaitu; 10%, 20% 30% dan 40%) seperti dipaparkan pada Table 1. Disamping itu, di rancang pula jenis komposit material dengan variasi susunan berurutan antara serat karbon dan serat basalt.



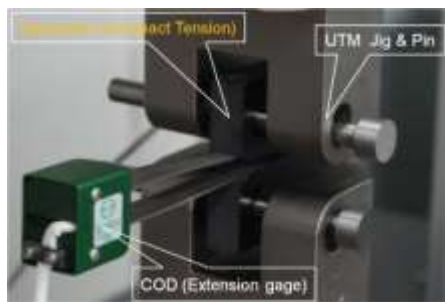
Gambar 2. Diagram proses VARTM



Gambar 3 konfigurasi spesimen *compact tension* (CT)

Tabel 1. Variasi dan komposisi interplay serat basalt dan serat karbon

Variasi komposit	Spesimen Kode	Berat fraksi (wt%)		Dimensi spesimen (mm)
		CF	BF	
CBC-1	CB-1	72	8	75 x 72 x 15
CBC-2	CB-2	64	16	75 x 72 x 15
CBC-3	CB-3	56	24	75 x 72 x 15
CBC-4	CB-4	48	32	75 x 72 x 15
BCB	B-1	64	16	75 x 72 x 15
CBCBC	B-2	48	32	75 x 72 x 15



Gambar 4 Pengujian tarik specimen

Tabel 2. Rata – rata ketangguhan patahan hybrid komposit interply serat karbon dan serat basalt.

Hybrid composites	CT Code	$(P_{max}/P_0)^{-1}$	B (cm)	W (cm)	a (cm)	$x = (a/w)$	F_Q (MPa√m)	$2.5(K_{Ic}^2/σ_y)$ (Mpa√m)
CFRP	C ₀	1.085	1.719	6.06	3.82	0.55	36.695	0.012
C ₀ /B ₀	C ₁	1.073	1.711	6.84	3.77	0.55	35.569	0.013
C ₁₀ /B ₁₀	C ₂	1.067	1.623	6.40	3.44	0.53	34.789	0.012
C ₂₀ /B ₂₀	C ₃	1.078	1.585	6.34	3.38	0.53	33.696	0.012
C ₄₀ /B ₄₀	C ₄	1.083	1.480	5.92	3.17	0.54	34.114	0.012
B ₀ /C ₀ /B ₀	B ₁	1.031	1.504	6.02	3.23	0.54	35.384	0.013
C ₁₀ /B ₁₀ /C ₁₀ /B ₁₀ /C ₁₀	B ₂	1.073	1.580	6.00	3.24	0.54	36.083	0.013
BFRP	B ₀	1.069	1.400	5.60	3.06	0.55	26.040	0.007

Metode dan sintesa kegagalan patahan

Metode eksperimen

Ketangguhan patah hybrid komposit interply serat karbon–basalt/epoxy diuji menurut modulus tarikan (*fracture toughness mode I*). Kompak tension (CT) spesimen diuji menggunakan *universal testing*

machine (Unitec-M, R&B) dengan load cell 2 ton. (lihat Gambar 4). Sedangkan perambatan retak diukur menggunakan *clip-on gage* (epsilon, technology Corp. Jackson, WY USA) dengan cross head speed konstan pada 1 mm/min. Dalam penelitian ini, 5 kali pengujian dilakukan untuk setiap variasi CT spesimen.

Sintesa kegagalan patah.

Analisa tegangan pada ujung retakan akibat tarikan (*farcture toughness mode I*) dari komposit material dengan menggunakan modifikasi metode analitis oleh Westergard, Irwin menyatakan bahwa faktor intensitas tegangan (*stress intensity factor*) K_Q (MPa√m) sangat berpengaruh terhadap ketangguhan retakan material. Pada umumnya ketangguhan patahan tergantung pad faktor dimensi seperti ketebalan, lebar, dan gaya beban, yang mana itu akan mempengaruhi sifat tegangan dan regangan bidang (*plane stress* atau *plane strain*) yang akan terjadi pada benda uji. Secara teoritis, akibat penarikan beban P (kN), umumnya, karena tegangan luluh (*yield stress*) maka pada ujung retakan akan terjadi deformasi plastik. Dengan demikian karakteristik ketangguhan patahan ditentukan menurut persamaan berikut;

$$B, a, (w-a) > 2.5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_{sy}} \right) = K_{Ic} \quad (1)$$

dimana; K_{Ic} (MPa√m) adalah harga kritis dari faktor intensitas tegangan K_Q (MPa√m) yang mengakibatkan kegagalan statik pada retakan tarik (*fracture toughness mode I*). σ_{sy} (MPa) adalah tegangan luluh material pada beban penarikan.

Kemudian, faktor intensitas tegangan K_Q (MPa√m) ditentukan dari persamaan;

$$K_Q = \frac{P_Q}{Bw^{0.5}} f(x) \quad (2)$$

dimana ; $x = a/w$

Faktor koreksi untuk specimen CT menurut persamaan *Swarley* (ASTMD-5045, 2007) adalah sebagai berikut;

$$f(x) = \frac{D}{N^{3/2}} [0.886 + 4.64(x) - 13.32(x)^2 + 14.72(x)^3 - 5.60(x)^4] \quad (3)$$

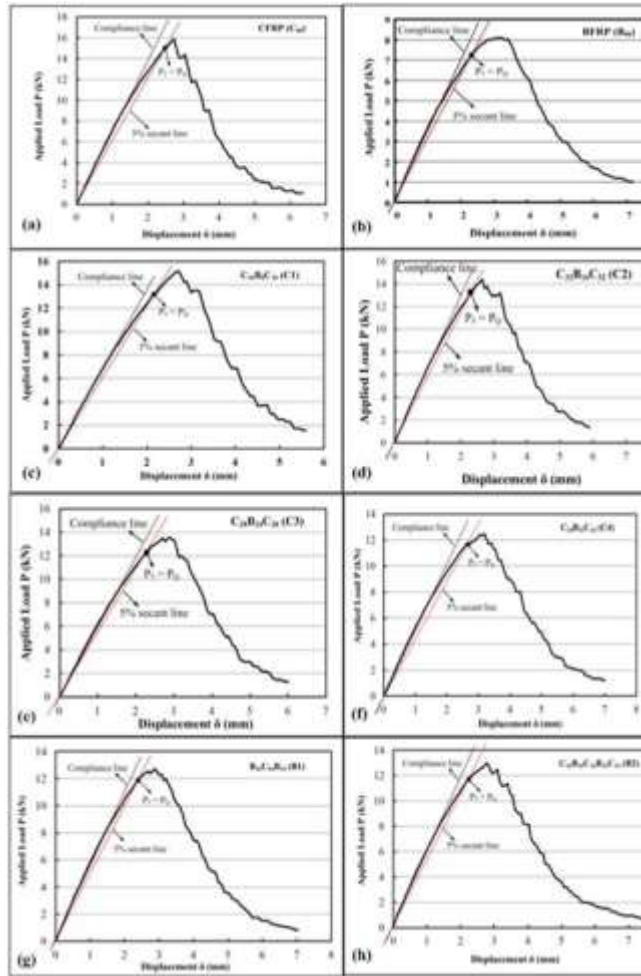
Dengan; $D = (2 + x)$, $N = (1 - x)$

dimana; B adalah ketebalan specimen (mm), w adalah lebar specimen (mm), a menunjukkan perambatan retak (mm). P_Q menunjukkan beban kritis yang ditentukan pada daerah slope 5% pada kurva tegangan regangan. faktor pembebanan ditentukan bahwa;

$$\frac{P_{max}}{P_Q} \leq 1.1 \quad (4)$$

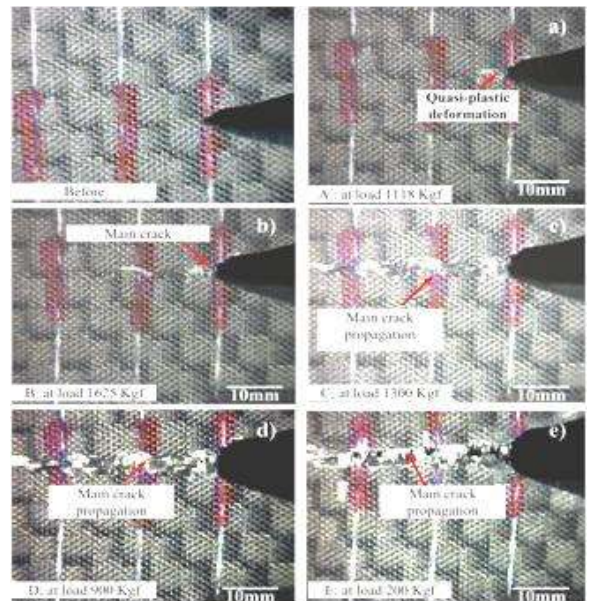
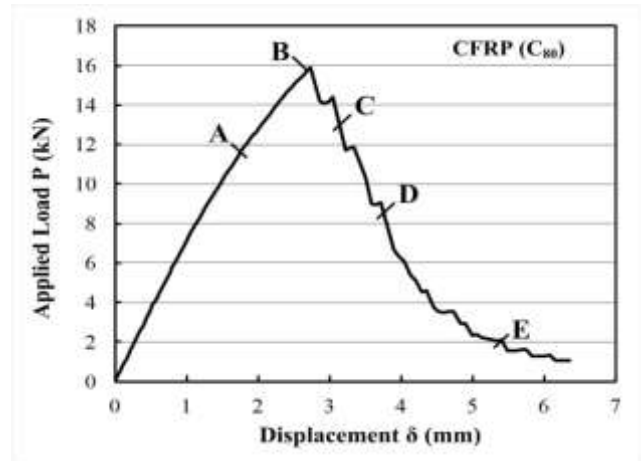
dimana; P_{max} merupakan beban maksimum yang dihasilkan dari pengujian terhadap variasi spesimen. Menggunakan persamaan – persamaan matematik

tersebut di atas, diperoleh hasil perhitungan sebagaimana diilustrasikan pada Table 2.



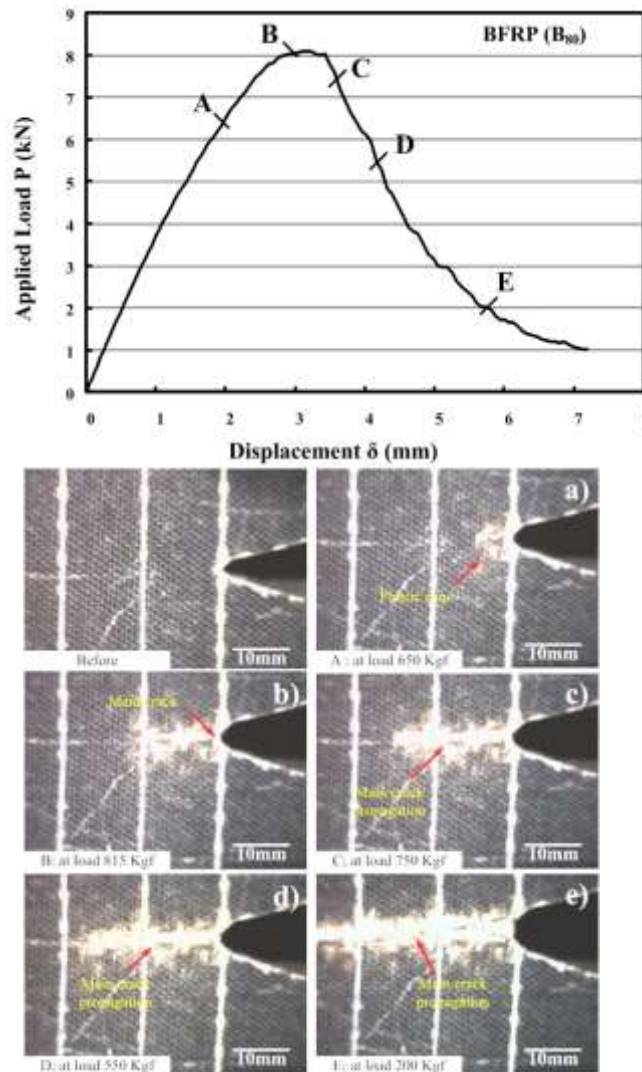
Gambar 5 Kurva *load – displacement* untuk material hibrid komposit interply serat karbon dan serat basalt/epoxy (C₈₀, B₈₀, C₁, C₂, C₃, dan C₄). Gambar 5(a-h) menunjukkan perilaku pembebanan tarik (*tensile*) material hibrid komposit interply antara serat karbon dan serat basalt untuk berbagai konfigurasi laminasi. Menurut 5% *secant line* untuk setiap konfigurasi hibrid komposit dipergunakan dalam menentukan nilai beban kritis, dimana $P_Q = P_5$. Kondisi ini juga diteliti oleh (Zhu et al., 2012). Hubungan antara pembebanan dan perambatan retak untuk komposit dengan serat karbon dan serat basalt adalah diilustrasikan seperti pada Gambar 6 dan 7, masing – masing. Gambar 6 mengilustrasikan proses perambatan retak dari komposit serat karbon. Kita perhatikan saat pembebanan meningkat secara linier yang ditunjukkan 0 sampai A. Pada kondisi tersebut, di daerah ujung “*notch*” belum terjadi retakan secara makro. Selanjutnya beban berlanjut hingga maksimum (titik B), dimana pada daerah ujung retakan dari specimen telah dapat diamati terjadinya retak yang di daerah “*Quasi plastic deformation*”. Selain itu juga kurva mengalami deviasi dari

kondisi linier. Sifat tersebut adalah efek retakan yang terjadi. Sama halnya dengan penelitian yang telah dilakukan oleh (M. E. Launey et al., 2009; Q. Liu et al., 2008). Selanjutnya, beban turun secara mendadak, yang ditunjukkan dengan perilaku “*Jump* atau *Pop-in*” (titik B ke C). Pada kondisi ini retakan makro telah terjadi seperti ditunjukkan pada gambar 6b-c. Seterusnya pembebanan menyebabkan perambatan retak berlanjut dari titik C hingga titik E, yang ditunjukkan pada gambar 7d-e.



Gambar 6. Konfigurasi daerah perambatan retak hibrid komposit serat karbon.

Metode yang sama dilakukan pula untuk material komposit serat basalt. Perbedaan yang terjadi antara serat karbon dan serat basalt adalah tidak terjadinya reaksi *jump* atau *pop-in* setelah beban maksimum dan terjadi perambatan retak terjadi secara stabil. (lihat Gambar 7).



Gambar 7. Konfigurasi daerah perambatan retak hibrid komposit serat basalt

Hasil dan diskusi

Ketangguhan patah akibat peningkatan fraksi berat serat basalt pada komposit serat karbon.

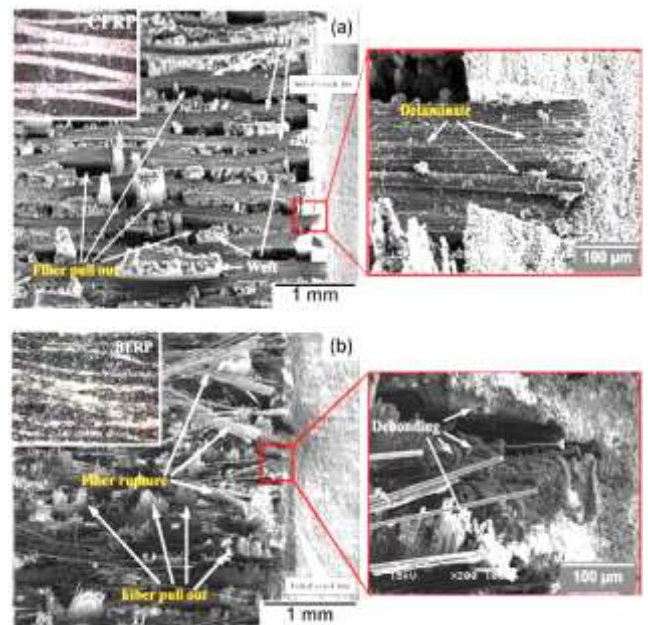
Hasil pengujian tarik untuk CT specimen dengan variasi peningkatan fraksi berat serat karbon di laminasi pada komposit serat karbon adalah ditunjukkan seperti pada Gambar 5. Dari hasil tersebut dapat dijelaskan bahwa komposit dengan serat karbon (C_{80}) memiliki nilai pembebanan tertinggi yaitu 16.068 kN. Akan tetapi setelah beban maksimum secara tiba – tiba drop. Penurunan beban pada C_{80} terjadi kondisi “Pop-in”. Perilaku ini menunjukkan bahwa komposit dengan penguat serat karbon mengalami patahan tarikan semi stabil. Ini juga juga merupakan ciri dari pada material dengan sifat getas (*brittle*). Sedangkan untuk komposit dengan serat basalt adalah sebesar 8.235kN dan setelah beban maksimum penurunan beban terjadi secara stabil yang berarti memiliki strain yang lebih panjang. Selain itu juga komposit

dengan serat basalt memiliki sifat *deformable* yang lebih baik dari pada komposit serat karbon. (Liu et al., 2008) menjelaskan pula bahwa sifat patahan dan KIC adalah sangat tergantung pada *linear density* dari anyaman dan arah perambatan retak.

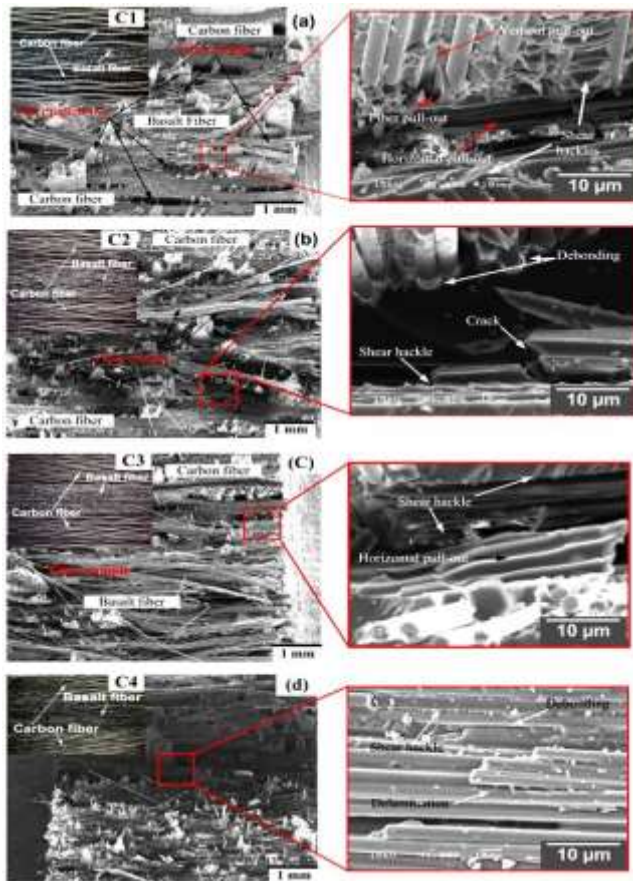
Kombinasi serat karbon dan serat basalt dengan matrik tunggal sebagai material komposit, akibat perlakuan tarik menunjukkan penurunan beban maksimum secara linier. Namun kekakuannya meningkat. Disamping itu, peningkatan fraksi berat serat basalt pada komposit serat karbon berdampak pada karakteristik patahan menjadi stabil. Dengan kata lain, bahwa peningkatan fraksi berat serat basalt berdampak negatif terhadap ketangguhan patahan, sebagaimana juga di jelaskan oleh (P.S. Shivakumar Gouda, 2011; Taketa et al., 2010). Prosentase pengaruh peningkatan fraksi berat serat basalt terhadap komposit serat karbon masing – masing 3.15%, 5,46%, 8,87%, dan 7.56% untuk setiap konfigurasi serat basalt (10%, 20%, 30% dan 40%).

Ketangguhan patah akibat variasi laminasi serat basalt pada komposit serat karbon.

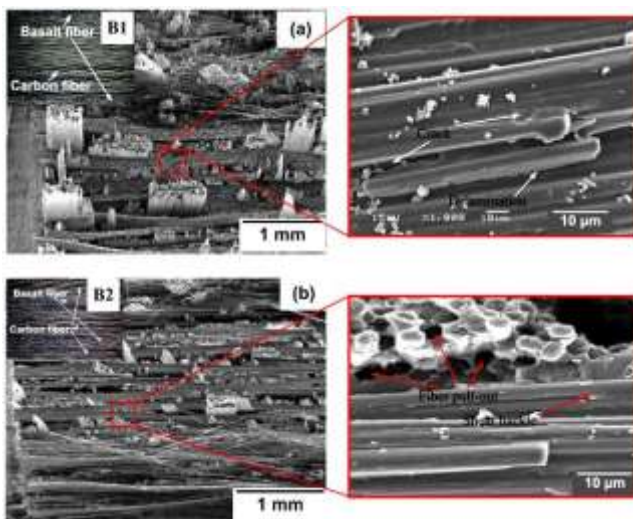
Gambar 5d, 5g dan 5h, menggambarkan karakteristik ketangguhan patah komposit material sebagai pengaruh dari variasi susunan antara serat karbon dan serat basalt. Seperti dijelaskan dari penelitian sebelumnya oleh (Chun-hua Zhang, 2011; Czizany et al., 2005; Song et al., 2007), dan diperoleh bahwa interplay serat basalt terdistribusi merata di dalam komposit sert karbon ($C_{16}B_{16}C_{16}B_{16}C_{16}$) menunjukkan intensitas ketangguhan patahan yang baik dibanding dengan konfigurasi lainnya yaitu C2 ($C_{32}B_{12}C_{32}$) dan B1 ($B_8C_{64}B_8$).



Gambar 8 photo SEM patahan spesimen komposit material; a. serat karbon (C_{80}), b. serat basalt (B_{80}).



Gambar 9. photo SEM dari spesimen komposit material interply antara serat karbon dan serat basalt/epoxy ; a. C₁, b. C₂, c. C₃, d. C₄



Gambar 10. photo SEM patahan spesimen komposit material dengan distribusi posisi laminasi; a. B₁, b. B₂.

Karakteristik patahan interply hibrid komposit
Karakteristik patahan untuk pengujian ketangguhan patahan tarik dari specimen uji *compact tension* (CT) menunjukkan bahwa pull-out, debonding, unreveled merupakan penampakan yang umum terlihat (M. E. Launey et al., 2009; Toygar et al.,

2006). Dalam hal ini, komposit serat karbon menunjukkan patahan yang lebih rata dibanding komposit serat basalt. Disamping itu *debonding* serat pada ujung retak (*notch*) debonding dan delamination mendominasi patahan komposit serat basalt akibat dari sifat deformability serat basalt. Selain itu juga “*shear hackle*” diamati pada komposit hibrid interply C₂, C₃ dan C₄ yang di akibatkan oleh tegangan maksimum pada daerah matrik dengan arah yang tegak lurus delaminasi. Adapun bentuk dan karakteristik patahan dapat ditunjukkan seperti pada gambar 8, 9 dan 10.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan analisis yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut. Teknik manufaktur komposit material hibrid serat karbon dan serat basalt dengan menggunakan metode vakum injeksi (*vacuum assisted resin transfer molding* “*VARTM*”) adalah sangat efektif untuk menurunkan biaya produksi dan meningkatkan efisiensi waktu kerja. Ketangguhan patahan dengan modulus tarik (*fracture toughness mode I*) sangat efektif untuk dapat menentukan ketangguhan dari material komposit hibrid interply. Peningkatan serat basalt hibrid dengan serat karbon telah memberikan dampak positif berupa peningkatan elastisitas dan penurunan biaya produksi, walaupun menurunkan harga *fracture toughness* material. Selain itu pemanfaatan serat basalt dapat mendorong terciptanya lingkungan yang bersih karena memiliki sifat yang tidak beracun. Selanjutnya dapat disimpulkan pula bahwa distribusi laminasi serat basalt pada komposit serat karbon mampu mendistribusikan tegangan secara merata sehingga dapat memberikan efek positif pada sifat ketangguhan patahan tarik dari hibrid komposit material.

Ucapan terima kasih

Pada kesempatan ini saya bersyukur dapat menyelesaikan makalah ini. Selanjutnya saya ucapkan terima kasih kepada fakultas teknik mesin Universitas Udayana yang telah mendorong mewujudkan, memberikan kesempatan dan membiayai peper ini sehingga dapat ikut serta dalam kegiatan seminar SNTTMXII 2013.

Daftar pustaka

Al-Qureshi, H.A., Automobile leaf springs from composite materials, *J Mater Process Technol* vol. 118, pp. 58–61., (2001).
Artemenko, S.E., Polymer composite materials made from carbon, basalt, and glass fibres. Structure and properties, *FIBRE CHEMISTRY*, 35, 3, 226-229, (2003).
Artemenko, S.E., Arzamastsev, S.V., Shatunov, D.A., & Vyazenzkov, A.A., Basalt plastics — new materials for

- road construction, *FIBRE CHEMISTRY*, 40, number 6, 499-502, (2008).
- Astmd-5045, Standard test methods for plane-strain fracture toughness and strain energy release rate of plastic materials. ASTM International, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, (2007).
- Bender, D., Schuster, J., & Heider, D., Flow rate control during vacuum-assisted resin transfer molding (varm) processing, *Composites Science and Technology*, 66(13), 2265-2271, (2006).
- Chun-Hua Zhang, J.-B.Z., Mu-Chao Qu and Jian-Nan Zhang, Toughness properties of basalt /carbon fiber hybrid composites, *Advanced Materials Research*, Vols. 150-151, pp 732-735, (2011).
- Cramer, D.R., Taggart, D.F., & Hypercar, Design and manufacture of an affordable advanced - composite automotive body structure., Paper presented at the The 19th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition, pp. 1-12, (2002).
- Czigany, T., Poloskei, K., & Karger-Kocsis, J., Fracture and failure behavior of basalt fiber mat-reinforced vinylester/epoxy hybrid resins as a function of resin composition and fiber surface treatment, *Journal of Materials Science*, 40(21), 5609-5618, (2005).
- Hosseinzadeh, R., Shokrieh, M.M., & Lessard, L.B., Parametric study of automotive composite bumper beams subjected to low-velocity impacts, *Composite Structures*, Vol. 68, pp. 419-427, (2005).
- I. M. De Rosa, F.M., G. Pulci, C. Santulli, F. Sarasini, J. Tirillò, M. Valente, Post-impact mechanical characterisation of e-glass/basalt woven fabric interply hybrid laminates, *eXPRESS Polymer Letters* Vol.5, No.5 449-459, (2011).
- I.D.G. Ary Subagia, & Kim, Y., A study on flexural properties of carbon-basalt/epoxy hybrid composites, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27 (4), 987-992, (2013).
- Jane Maria Faulstich De Paivaa, S.M., Mirabel Cerqueira Rezende, Comparison of tensile strength of different carbon fabric reinforced epoxy composites, *Materials Research*, Vol. 9, No. 1, 83-89, (2006).
- Jayabal, S., Natarajan, U., & Sathiyamurthy, S., Effect of glass hybridization and staking sequence on mechanical behaviour of interply coir-glass hybrid laminate, *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 34, No. 2, 293-298., (2011).
- Justin B. Alms, J.L.G., Suresh G. Advani, Mechanical properties of composite structures fabricated with the vacuum induced preform relaxation process, *Composite Structures* 92 2811-2816, (2010).
- Liu, Q., & Hughes, M., The fracture behaviour and toughness of woven flax fibre reinforced epoxy composites, *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 39(10), 1644-1652, (2008).
- M. E. Launey, D. C. Hofmann, J.-Y. Suh, H. Kozachkov, W. L. Johnson, & Ritchie, A.R.O., Fracture toughness and crack-resistance curve behavior in metallic glass-matrix composites, *APPLIED PHYSICS LETTERS*, 94, 241910, (2009).
- Manders, P.W., & Bader, M.G., The strength of hybrid glass/carbon fibre composites, *Journal of Materials Science*, Vol 16(Issue 8), pp. 2246-2256, (1981).
- Nasmi Herlina Sari, S., Ahmad Taufan, Ignk Yudhyadi, Ketahanan bending komposit hybrid serat batang kelapa/serat gelas dengan matrik urea formaldehyde, *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Cakram*, Vol. 5 No.1, pp. 91- 97, (2011).
- P.S. Shivakumar Gouda, S.K.K., Prabhswamy. S, Dayananda Jawali, Fracture toughness of glass-carbon (0/90)s fiber reinforced polymer composite – an experimental and numerical study, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, , Vol. 10, No.8, pp.671-682, (2011).
- Q. Liu, & Hughes, M., The fracture behaviour and toughness of woven flax fibre reinforced epoxy composites, *Composites: Part A*, 39, 1644-1652, (2008).
- Raja, M.N.G., & A.N.Harirao, Hybrid effects on tensile properties of carbon/glass angle ply composites, *Advances in Materials*, Vol. 2, No. 3, pp. 36-41, (2013).
- Salvatore Carmisciano, Igor Maria De Rosa, Fabrizio Sarasini, Alessio Tamburrano, & Valente., M., Basalt woven fiber reinforced vinylester composites: Flexural and electrical properties, *Materials and Design*, 32, 337-342, (2011).
- Saravanan, D., Spinning the rock - basalt fiber, *Journal of the institution of engineering* 86, 39-45, (2006).
- Singha, K., A short review on basalt fiber, *International Journal of Textile Science*, 1(4), 19-28, (2012).
- Song, J.H., & Lim, J.K., Fatigue crack growth behavior and fiber orientation of glass fiber reinforced polycarbonate polymer composites, *Metals and Materials International*, 13(5), 371-377, (2007).
- Sudarsono, Kajian sifat mekanik material komposit propeler kincir angin standard naca 4415 modifikasi, Seminar Nasional Aplikasi Sains & Teknologi (SNAST) Periode III, Yogyakarta, ISSN: 1979-911X, pp. A-379-387, (2012).
- Taketa, I., Ustaroz, J., Gorbatikh, L., Lomov, S.V., & Verpoest, I., Interply hybrid composites with carbon fiber reinforced polypropylene and self-reinforced polypropylene, *Composites Part a-Applied Science*

- and Manufacturing, 41(8), 927-932, (2010).
- Toygar, M.E., Toparli, M., & Uyulgan, B., An investigation of fracture toughness of carbon/epoxy composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 25(18) 1887-1895, (2006).
- Velde.K, V.D., Kiekens.P, & Langenhove.L, V.), Basalt fibres as reinforcement for composites, from http://www.basaltex.com/files/cms1/basalt-fibres-as-reinforcement-for-composites_ugent.pdf. 2003
- Wei, B., Song, S.H., & Cao, H.L., Strengthening of basalt fibers with nano-sio₂-epoxy composite coating, *Materials & Design*, 32(8-9), 4180-4186, (2011).
- Zhang, J., Chaisombat, K., He, S., & Wang, C.H., Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics for lightweight load bearing structures, *Materials and Design*, 36, pp. 75–80, (2012).
- Zhu, X.K., & Joyce, J.A., Review of fracture toughness (g, k, j, ctod, ctoa) testing and standardization, *Engineering Fracture Mechanics*, 85, 1-46, (2012).