

RESPON *POLYMERIC FOAM* YANG DIPERKUAT SERAT TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT (TKKS) AKIBAT BEBAN TEKAN STATIK DAN IMPAK (SIMULASI NUMERIK)

Oleh

Muhtil Badri M¹, Bustami Syam², Samsul Rizal³, Krishna Surya Buana⁴

1) Mahasiswa Program Magister Teknik Mesin FT. USU
Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin Universitas Riau
e-mail: muhtilbadri@yahoo.com

2) Staf Pengajar Program Magister Teknik Mesin FT. USU
e-mail: bustamisyam@yahoo.com

3) Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Syiah Kuala Banda Aceh
e-mail: samsul_r@yahoo.com

4) PT. Perkebunan Nusantara III Sumatera Utara

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki respon *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS akibat beban tekan statik dan dinamik melalui eksperimen dan simulasi numerik. Respon yang akan diamati adalah tegangan maksimum, kekuatan retak/patah, serta distribusi tegangan. Karakteristik material berupa modulus elastisitas dan analisa kerusakan akan diselidiki dalam penelitian ini. Secara eksperimen, respon dan karakteristik beberapa material, yaitu: resin termoset, polyurethane, dan *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS akan diamati melalui uji tekan statik aksial. Secara numerik, respon *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS yang akan diselidiki adalah distribusi tegangan dari beberapa jenis pembebanan, yaitu: tekan statik aksial, tekan bending, dan tekan impak Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB). Spesimen uji tekan statik aksial dibuat berdasarkan standar ASTM D-1621-00. Spesimen uji *polymeric foam* terdiri dari beberapa material penyusun dengan persentase massa yang berbeda, yaitu: 60 % resin jenis 157 BQTN Ex Series sebanyak, 20% polyurethane, 5% serat TKKS yang dihaluskan, serta 5% katalis methyl ethyl keton proxide (MEKPO). Spesimen uji dieksekusi menggunakan alat uji Shimadzu Servopulser. Analisa numerik melalui simulasi komputer menggunakan software berbasis metode elemen hingga (MEH) yaitu ANSYS Rel. 5.4 untuk simulasi tekan statik aksial dan bending sedangkan MSC/NASTRAN Rel. 4.5 untuk simulasi impak tekan SHPB. Dari hasil uji tekan statik aksial diperoleh nilai modulus elastisitas resin sebesar 118,78 MPa, polyurethane 0,18 MPa, dan *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS sebesar 17,22. Tegangan maksimum yang direspon oleh resin adalah 0,582 MPa, polyurethane 0,0044 MPa, dan *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS sebesar 0,106 MPa. Nilai kekuatan retak terhadap masing-masing spesimen uji juga berbeda, kekuatan retak resin adalah 1,18 MPa, polyurethane sebesar 0,075 MPa, dan *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS sebesar 0,133 MPa. Kegagalan resin akibat beban tekan statik aksial ditandai dengan perbesaran ukuran penampang lateral (barreling), kerusakan polyurethane ditandai dengan terbentuknya lipatan-lipatan permanen di dinding spesimen yang menunjukkan respon plastis sempurna, dan kegagalan *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS ditandai dengan pembesaran rongga-rongga yang acak. Berdasarkan hasil simulasi numerik diperoleh tegangan Von Mises maksimum terhadap *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS akibat beban statik aksial sebesar 0,186 MPa sedangkan tegangan maksimum Von Mises akibat bending statik nilainya jauh lebih besar, yaitu 50,518 MPa. Hasil simulasi bending statik menunjukkan bahwa titik kritis terjadi di lokasi beban diberikan. Untuk beban impak, hasil simulasi menunjukkan bahwa *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS memiliki tegangan maksimum Von Mises impak bending sebesar 69,44 MPa dan impak SHPB sebesar 102,96 MPa. Hasil simulasi impak menunjukkan bahwa kenaikan waktu impak menyebabkan penurunan terhadap tegangan impak.

Kata kunci: *polymeric foam*, serat TKKS, modulus elastisitas, tegangan, beban tekan statik aksial, tekan bending, impak SHPB

1. Pendahuluan

Tandan kosong kelapa sawit (TKKS), sebagai limbah dari Pabrik Kelapa Sawit (PKS) jumlahnya cukup banyak, yaitu 1,9 juta ton berat kering atau setara 4 juta ton berat basah per tahun. PT. Perkebunan Nusantara III (PTPN-III) sendiri menghasilkan limbah TKKS sebanyak 1350 ton per hari.

Pemanfaatan TKKS untuk produk teknologi bermanfaat masih sangat terbatas jumlahnya. Beberapa di antaranya telah dimanfaatkan antara lain untuk pembuatan papan partikel. Saat ini, dengan turunnya harga *crude palm oil* (CPO) dipasaran dunia, pemanfaatan limbah sawit seperti TKKS untuk menjadi komoditi baru tentu sangat diperlukan. Selanjutnya, TKKS juga memiliki kekuatan tarik yang signifikan sebagai serat alam [1]. Dalam penelitian ini TKKS diolah untuk dijadikan serat untuk dicampur dengan resin termoset untuk selanjutnya dibuat bahan *polymeric foam*.

Beberapa penyelidikan respon mekanik statik dan dinamik terhadap *polymeric foam* yang dibuat dari *polyurethane* telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Deformasi yang *inelastic* (tidak elastis) terjadi terhadap *polymeric foam* akibat beban tekan statik menunjukkan respon yang khas [2]. Respon dinamik terhadap struktur *polymeric foam* dengan massa jenis 0,47 s.d. 7,0 g/cm³ yang dikenai beban impact mengakibatkan kerusakan yang aack terhadap dinding spesimen [3]. Respon akibat beban impact kecepatan tinggi dengan metode *Split Hopkinson Pressure Bar* (SHPB) telah diinvestigasi terhadap struktur *polymeric foam* dengan massa jenis 0,83 s.d. 1,46 g/cm³ [4]. Berdasarkan beberapa hasil penelitian tersebut belum ditemukan adanya pengkajian terhadap respon *polymeric foam* yang diperkuat oleh serat TKKS akibat beban tekan statik dan dinamik.

Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki respon *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS akibat beban tekan statik dan dinamik melalui eksperimen dan

simulasi numerik. Karakteristik material berupa modulus elastisitas dan analisa kerusakan akan diselidiki dalam penelitian ini. Secara eksperimen, respon dan karakteristik beberapa material, yaitu: resin termoset, polyurethane, dan *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS akan diamati melalui uji tekan statik aksial. Secara numerik, respon *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS yang akan diselidiki adalah distribusi tegangan dari beberapa jenis pembebanan, yaitu: tekan statik aksial, tekan bending, dan tekan impact *Split Hopkinson Pressure Bar* (SHPB).

Dengan mengetahui respon *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS akibat beban tekan statik dan dinamik adalah sangat bermanfaat untuk perencanaan produk untuk akan datang, karena perilaku material pada beban tekan statik dan dinamik belum banyak diketahui. Melalui uji tekan statik dapat diketahui perilaku tegangan tekan statik dari *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS.

2. Metode Eksperimen

Penelitian dibagi dalam dua tahap, yaitu: (1) Penyelidikan kekuatan tekan statik aksial akan dilaksanakan di Pusat Riset Impact dan Keretakan Program Magister Teknik Mesin FT-USU menggunakan alat uji Shimadzu Servopulser, (2) Penyelidikan secara simulasi akan dilaksanakan di IC-STAR USU menggunakan *software* ANSYS Rel. 5.4 dan MSC/NASTRAN Rel. 4.5.

Spesimen uji dibuat dari beberapa bahan penyusun. Komposisi, karakteristik fisik dan mekanik bahan penyusun ditunjukkan pada Tabel 1. Masing-masing spesimen uji tekan aksial dibuat dari bahan penyusun yang berbeda. Spesimen *polymeric foam* dibuat dari bahan *polyurethane*. Spesimen resin solid dibuat dari bahan resin termoset. Spesimen *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS dibuat dari

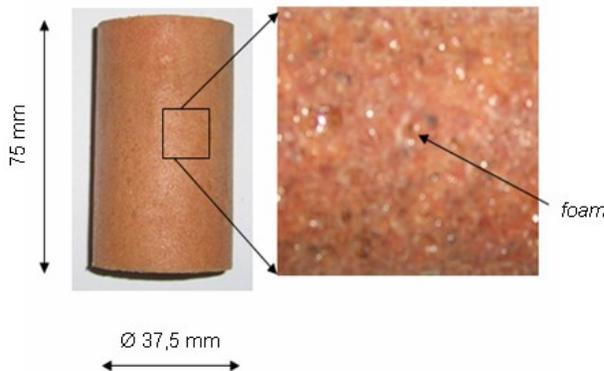
bahan *polyurethane*, resin termoset, dan serat TKKS dengan komposisi seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Geometri spesimen uji tekan statik aksial ditunjukkan pada Gbr. 1 s.d. 3. Spesimen uji tekan statik aksial sesuai dengan standar *American Society for Testing Materials* (ASTM) D 1621-00.

Beberapa bahan kimia tambahan juga digunakan selama proses pembuatan spesimen, yaitu: katalis, *aseton*, dan *wax*. Sebagai katalis di dalam pembentukan spesimen uji digunakan *metil etil keton peroksida* (MEKPO). *Aseton* digunakan untuk membersihkan sisa bahan kimia setelah proses pembuatan spesimen selesai dilakukan.

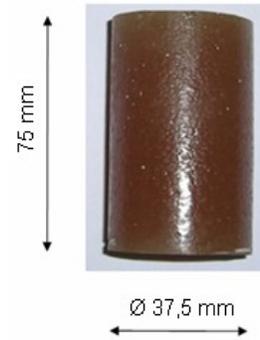
Tabel 1 Komposisi Bahan Penyusun Spesimen Uji

Bahan penyusun	Persentase massa
<i>Polyurethane</i>	20
Resin 157 BQTN-EX Series	60
Serat TKKS	15
MEKPO	5

Wax adalah bahan yang digunakan agar permukaan spesimen tidak melekat dengan dinding cetakan. Spesimen uji dibentuk di dalam sebuah cetakan. Berdasarkan massa spesimen uji yang diperoleh maka perkiraan bahan penyusun masing-masing spesimen dapat dilihat pada Tabel 2.

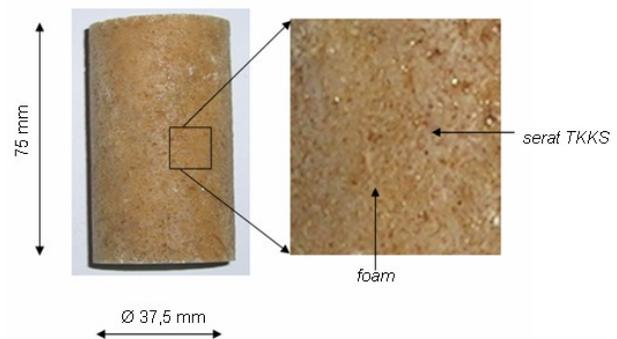


Gbr. 1 Spesimen Uji *Polyurethane*



Gbr. 2 Spesimen Uji Resin Termoset Solid

Pengujian tekan statik aksial dilakukan dengan menggunakan alat uji Shimadzu Servopulser di Pusat Impak dan Keretakan Program Magister FT-USU. Pengujian dilakukan pada temperatur 25 °C (berdasarkan standar ASTM D1621-00).



Gbr. 3 *Polymeric foam* yang Diperkuat Serat TKKS

Tabel 2 Massa Bahan Penyusun Spesimen Uji

No.	Spesimen	Massa (g)
1	<i>Polymeric foam</i>	
	Bahan penyusun terdiri atas:	
	- <i>Isocyanate</i>	0,36
	- <i>Polyol</i>	0,29
2	Resin termoset	
	Bahan penyusun terdiri atas:	
	- Resin 157 BQTN-EX Series	96,33
	- MEKPO	5,07
3	<i>Polymeric foam</i> diperkuat serat TKKS	
	Bahan penyusun terdiri atas:	
	- <i>Isocyanate</i>	1,88

- Polyol	1,53
- Resin 157 BQTN-EX Series	10,23
- Serat TKKS	1,71
- MEKPO	0,87

Setelah proses pengujian selesai, data beban (F) dan perubahan panjang (δ) di-plot ke dalam MS Excel untuk pengolahan data. Grafik respon uji tekan statik aksial diperoleh melalui input data spesimen dan hasil uji

3. Simulasi Numerik

Simulasi dengan menggunakan komputer dilaksanakan di IC-STAR USU. Software yang digunakan adalah ANSYS Rel. 5.4 dan MSC/NASTRAN Rel. 4.5 yang berbasis Metode Elemen Hingga (MEH). Simulasi komputer dilakukan untuk mengklarifikasi perilaku mekanik yang terjadi akibat pengujian secara eksperimental. Untuk membantu dalam simulasi ini, khususnya dalam membuat model akan digunakan software AutoCAD.

3.1 Simulasi tekan statik aksial dan bending

Sebelum menggambar model dari spesimen uji yang akan disimulasikan, maka terlebih dahulu mendefinisikan *Element Type* dan *Material Properties* dari spesimen uji. Hal ini dimaksudkan untuk menginput sifat-sifat material yang disimulasikan pada program ANSYS Rel. 5.4. Beberapa tahap simulasi dapat ditentukan melalui beberapa tahap. *Element Type* yang dipilih berasal dari elemen padat (*solid*) yang digunakan untuk perhitungan struktur adalah *Type Solid92*. Sifat-sifat material yang diinputkan pada program ANSYS Rel. 5.4 meliputi *Orthotropic Material*. Untuk keperluan simulasi, model geometri dibuat $\frac{1}{2}$ bagian dari model penuh benda uji yang sebenarnya dalam tiga dimensi, tidak dibuat penuh karena dianggap model mempunyai bentuk yang simetris dan bertujuan agar menghemat memori dan

mempersingkat waktu proses. Sebelum pembuatan model dilakukan maka dimensi geometri spesimen uji tekan statik aksial dan *bending* harus diketahui terlebih dahulu. Spesimen uji tekan statik dan *bending* berdasarkan standar ASTM D 1621 – 00 dan ASTM D 790 – 00.

Arah gerak yang ditahan pada tumpuan adalah perpindahan dalam arah X dan Y untuk spesimen uji tekan statik aksial dan *bending*. Beban yang diberikan merupakan beban tekan dalam arah Z untuk spesimen uji tekan statik aksial dan *bending*.

3.2 Simulasi dampak bending

Simulasi dampak *bending* dan SHPB dilakukan melalui analisa dengan metode elemen hingga (MEH). Analisa dengan simulasi komputer menggunakan software MSC/NASTRAN Rel. 4.5. Model spesimen uji digambar sesuai dengan dimensi dan geometri spesimen yang sebenarnya dengan menggunakan software AutoCAD. Permukaan spesimen dibagi dalam elemen-elemen yang berbentuk heksagonal atau tetrahedral dengan ukuran elemen sesuai dengan yang diinginkan dengan mengisi item-item yang diperlukan. Beban dampak *bending* yang diberikan berdasarkan perhitungan tegangan transmisi teoritik simulasi dampak SHPB, yaitu:

$$\sigma_T = \frac{2A_2E_3C_{o2}}{A_3E_3C_{o2} + A_2E_2C_{o3}} \sigma$$

$$\sigma_T = \frac{2,67 \times 10^{10}}{1,21 \times 10^{10} + 2,16 \times 10^{10}} 0,3 = 0,8 \times 0,3 = 0,24 \text{ MPa}$$

$$F = \sigma_T \cdot A$$

$$F = 0,24 \times 1103,91 = 264,94 \text{ N}$$

3.3 Simulasi tekan dampak SHPB

Permukaan spesimen dibagi dalam elemen-elemen yang berbentuk heksagonal atau tetrahedral dengan ukuran elemen sesuai dengan yang diinginkan dengan mengisi item-item

yang diperlukan. Data sifat mekanik spesimen seperti modulus elastisitas dan massa jenis diinput ke *software* MSC/NASTRAN Rel. 4.5. Pada titik-titik tertentu dari spesimen diberi *constraint* sehingga pada sumbu-sumbu yang diinginkan spesimen tidak dapat bergerak (sesuai dengan keadaan pada waktu melakukan pengujian di laboratorium).

Tegangan awal (σ) diasumsikan sama dengan tekanan udara yang dihasilkan oleh alat uji impak AGC, yaitu 0,3 MPa sehingga tegangan yang direfleksikan dapat ditentukan dengan:

$$\sigma_T = \frac{2,67 \times 10^{10}}{1,21 \times 10^{10} + 2,16 \times 10^{10}} 0,3 = 0,8 \times 0,3 = 0,24 \text{ MPa}$$

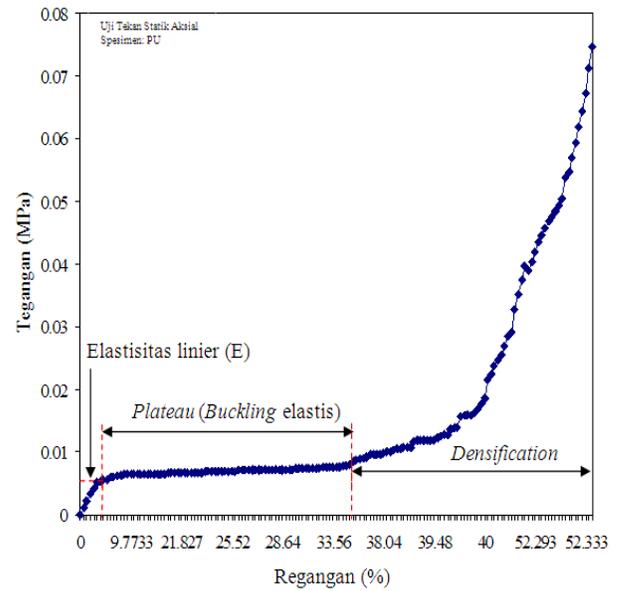
$$\sigma_R = \frac{A_3 E_3 C_{o2} - A_2 E_2 C_{o3}}{A_3 E_3 C_{o2} + A_2 E_2 C_{o3}} \sigma$$

$$\sigma_R = \frac{0,12 \times 10^{10} + 2,16 \times 10^{10}}{0,12 \times 10^{10} + 2,16 \times 10^{10}} 0,3 = -0,9 \times 0,3 = -0,27 \text{ MPa}$$

4. Hasil dan Diskusi

4.1 Hasil Pengujian Tekan Statik Aksial

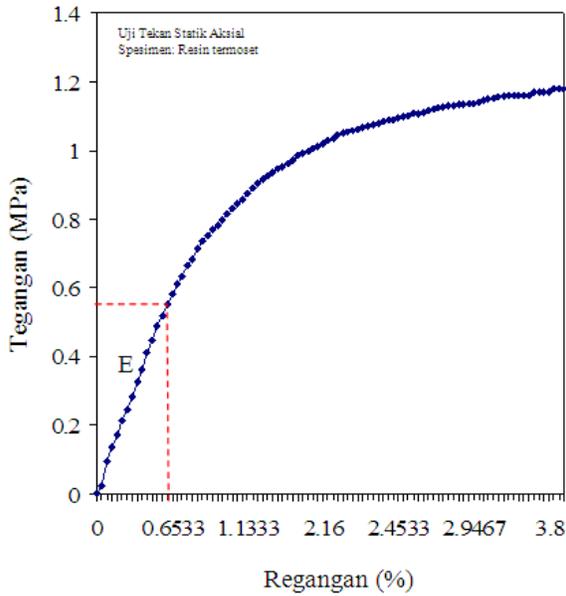
Hasil pengujian tekan statik menunjukkan karakteristik *polymeric foam* yang sangat spesifik, memuat informasi - informasi yang penting untuk membuktikan respon akibat beban tekan statik terhadap *polymeric foam*, seperti: modulus elastisitas, elastisitas linier, *plateau* (*buckling* elastis), dan *densification*. Tegangan tekan statik maksimum untuk respon elastisitas linier dicapai sekitar 0,0044 MPa pada regangan $\pm 0,0233$. Modulus elastisitas tekan statik *polymeric foam* diperoleh sebesar 0,18 MPa. Beberapa tingkat respon *polymeric foam* akibat beban tekan statik ditunjukkan pada Gbr. 4. Tegangan tekan di garis *plateau* (*buckling* elastis) dicapai berkisar 0,0044 MPa s.d. 0,0081 MPa dengan kenaikan regangan yang sangat tinggi, yaitu $\pm 0,0233$ hingga $\pm 0,351$. Kerusakan *foam* terjadi bersifat setempat di beberapa daerah yang acak. Kerusakan tersebut dapat dilihat pada waktu respon berada pada kondisi *plateau*.



Gbr. 4 Hubungan Tegangan-Regangan *Polymeric Foam* akibat Beban Tekan Statik Aksial

Densification atau kerusakan plastis terhadap *polymeric foam* menunjukkan kenaikan tegangan tekan statik yang sangat tinggi namun regangan yang relatif rendah. Tegangan tekan yang diperoleh di daerah *densification* berkisar antara 0,0081 MPa hingga 0,075 MPa dengan regangan sekitar 0,35 s.d. 0,52. Kerusakan plastis terjadi akibat *bending* (*bending fracture*) yang ditandai dengan adanya lipatan-lipatan permanen di permukaan spesimen uji.

Dari hasil pengujian tekan statik diperoleh beberapa respon material resin, seperti: tegangan maksimum elastis, modulus elastisitas tekan, dan tegangan patah. Respon tersebut dapat diketahui dari kurva yang menunjukkan hubungan tegangan-regangan resin yang diperlihatkan pada Gbr. 5.

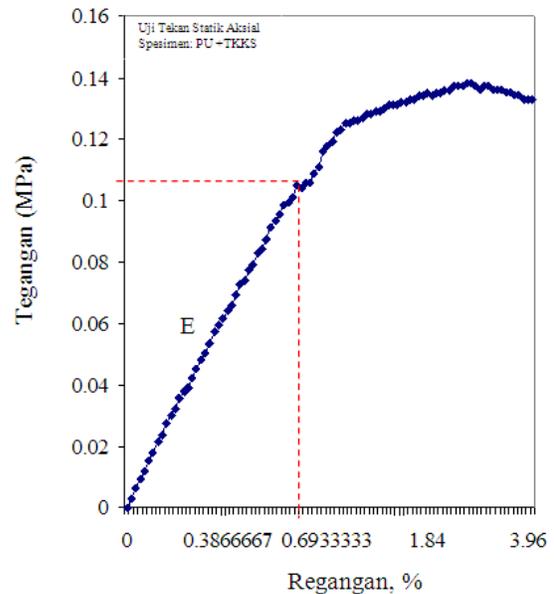


Gbr. 5 Hubungan Tegangan-Regangan Resin Termoset akibat Beban Tekan Statik Aksial

Tegangan maksimum di daerah elastis dicapai sebesar $\pm 0,582$ MPa dengan regangan $\pm 0,0049$. Modulus elastisitas akibat beban tekan diperoleh sekitar 118,78 MPa. Setelah melewati garis elastis, diameter spesimen uji bertambah dengan perlahan, fenomena ini disebut *barreling*. Pertambahan ukuran diameter akan berhenti saat spesimen patah. Tegangan yang dicapai saat spesimen resin patah akibat beban tekan statik adalah 1,18 MPa. Berdasarkan Gbr. 5 dapat diketahui bahwa resin bersifat lebih kaku dibandingkan *polymeric foam* karena patah pada regangan yang lebih kecil, yaitu 0,038.

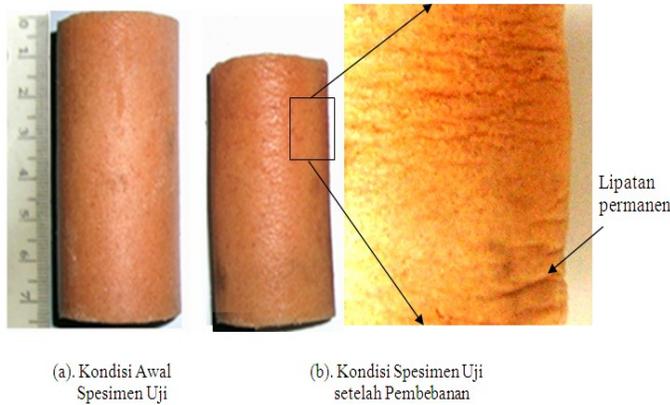
Hasil pengujian tekan statik menunjukkan beberapa respon material *polymeric foam* diperkuat serat TKKS, seperti: modulus elastisitas tekan dan tegangan patah. Respon tersebut dapat diketahui dari kurva yang menunjukkan hubungan tegangan-regangan *polymeric foam* diperkuat serat TKKS yang diperlihatkan pada Gbr. 6. Tegangan maksimum di daerah elastis dicapai sebesar $\pm 0,1011$ MPa dengan regangan $\pm 0,0059$. Modulus elastisitas tekan statik *polymeric foam* diperkuat serat TKKS

adalah 17,22 MPa. Dari Gbr. 6 dapat diketahui bahwa *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS bersifat lebih kaku dibandingkan *polymeric foam* karena patah pada regangan yang lebih kecil, yaitu 0,0396 namun lebih elastis dibandingkan dengan resin. Tegangan yang dicapai saat *polymeric foam* diperkuat serat TKKS patah sekitar 0,133 MPa. *Polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS menunjukkan respon inisial elastis yang disertai dengan deformasi inelastis hingga mencapai tegangan maksimum rata-rata sekitar 0,106 MPa.



Gbr. 6 Hubungan Tegangan-Regangan *Polymeric Foam* Diperkuat Serat TKKS akibat Beban Tekan Statik Aksial

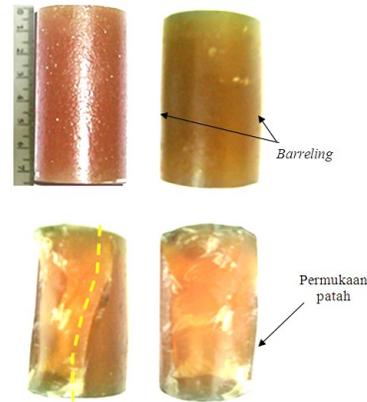
Foam menunjukkan respon awal elastis yang diikuti oleh respon inelastis. Beberapa spesimen *polymeric foam (polyurethane)* yang telah mengalami beban tekan statik ditunjukkan pada Gbr. 7. Secara makroskopik dapat dilihat di permukaan spesimen uji yang telah mengalami lipatan permanen seperti ditunjukkan pada Gbr. 7.



Gbr. 7 Model Kegagalan *Polymeric Foam* akibat Beban Tekan Statik Aksial

Kerusakan di dinding struktur *foam* disebabkan deformasi aksial dan lateral. Kerusakan dinding struktur *foam* ditandai dengan adanya lipatan-lipatan. Daerah lipatan tersebut merupakan kumpulan rongga-rongga yang terdeformasi secara platis. Lipatan-lipatan tersebut menandakan bahwa dinding rongga mengalami deformasi yang acak (*random planes failure*). Kondisi lipatan tersebut terjadi pada kondisi *densification* (kurva hubungan tegangan-regangan). Akibat lipatan tersebut struktur material menjadi lebih solid karena rongga-rongga mengecil. Di permukaan material juga terdapat bekas lipatan, bagian tersebut telah mengalami *buckling* yang elastis (*garis plateau* pada kurva tegangan-regangan). Bekas lipatan tersebut terjadi saat beban dilepaskan lipatan-lipatan di permukaan kembali pada posisi tertentu.

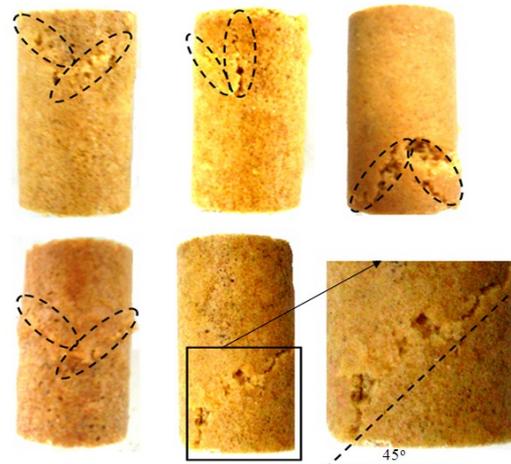
Model kegagalan akibat beban tekan statik terhadap resin yang solid dapat dilihat secara makroskopik pada Gbr. 8. Fenomena *barreling* menunjukkan ketidakseragaman deformasi yang menghambat arah deformasi arah lateral akibat gesekan yang terjadi antara bidang kontak spesimen uji terhadap dudukan spesimen. Kondisi *barreling* bermanfaat untuk menentukan lokasi kegagalan terhadap spesimen.



Gbr. 8 Model Kegagalan Resin Termoset akibat Beban Tekan Statik Aksial

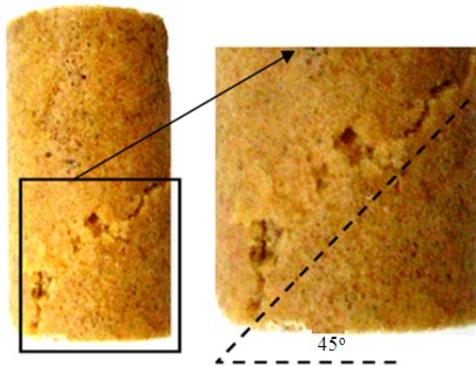
Spesimen uji cenderung hancur menjadi dua bagian yang terbelah secara vertikal sejajar aksis sentroid. Salah satu bagian terpecah berkeping-keping sedangkan bagian yang lain tetap utuh. Hasil uji tekan statik terhadap *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS menunjukkan respon yang khas, yaitu terjadinya *local buckling* pada dinding rongga. Untuk pembebanan yang berkelanjutan akan mengakibatkan konsentrasi tegangan terhadap bidang dimana *local buckling* terjadi.

Kegagalan dilihat secara makroskopik menunjukkan kegagalan geser yang ditandai dengan arah retak membentuk sudut 45° terhadap arah pembebanan seperti ditunjukkan pada Gbr. 9.



Gbr. 9 Model Kegagalan *Polymeric Foam* Diperkuat Serat TKKS akibat Beban Tekan Statik Aksial

Kegagalan terhadap *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS juga ditandai dengan terbentuknya beberapa rongga yang membesar yang dominan menghasilkan retak prematur.



Gbr.10 Penjalaran Retak *Polymeric Foam* Diperkuat Serat TKKS

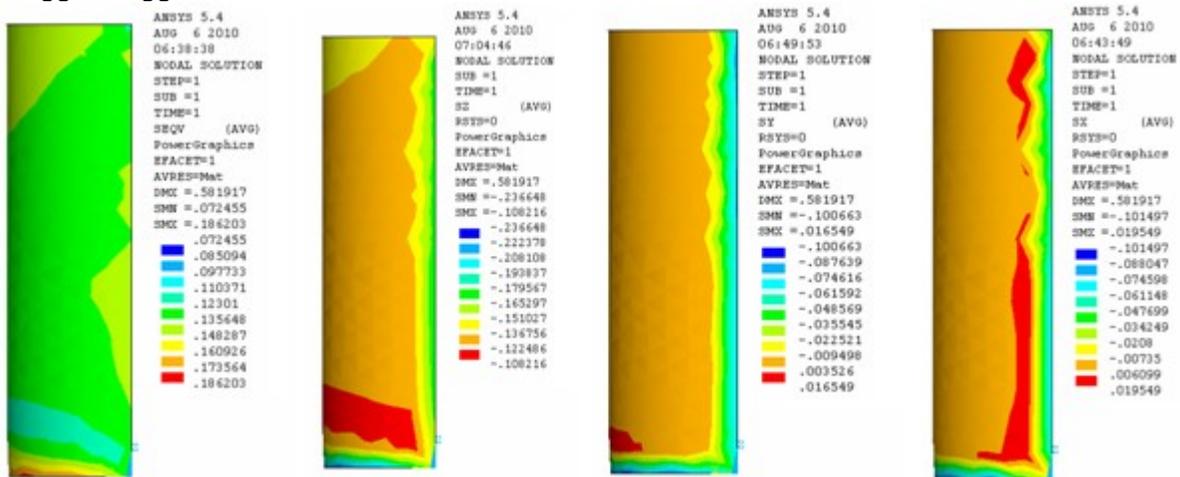
Rongga-rongga tersebut berukuran tidak seragam sehingga menimbulkan konsentrasi tegangan di beberapa titik. Konsentrasi tegangan menyebabkan rongga-rongga tersebut membesar dan

dapat dilihat secara makroskopik di dinding struktur. Retak akan terus menjalar saat beban diberikan hingga spesimen patah. Penjalaran retak dapat dilihat pada Gbr. 10.

4.2 Simulasi uji tekan statik

Dari hasil analisa dapat ditampilkan *contour plot* penjalaran tegangan yang terdistribusi pada model spesimen yang diberikan. Distribusi tegangan yang merupakan respon uji tekan statik aksial akan disajikan pada Gbr. 11.

Dari Gbr. 11 dapat dilihat bahwa *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS memberikan respon tegangan normal dalam bentuk tegangan tarik dan tekan. Distribusi tegangan tidak merata di seluruh bagian spesimen uji. Tegangan maksimum terjadi di daerah *constraint* dan terus menyebar di sepanjang sumbu arah Z. Besarnya tegangan normal maksimum arah X sekitar 0,101 MPa (tegangan tekan). Bentuk penjalaran distribusi tegangan arah X ditunjukkan pada Gbr. 11.



Gbr. 11 Distribusi Tegangan Spesimen Uji Tekan Statik Aksial

Berdasarkan Gbr. 11 dapat dilihat bahwa *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS memberikan respon

distribusi tegangan normal arah Y sedikit lebih kecil dibandingkan dengan tegangan normal arah X. Tegangan

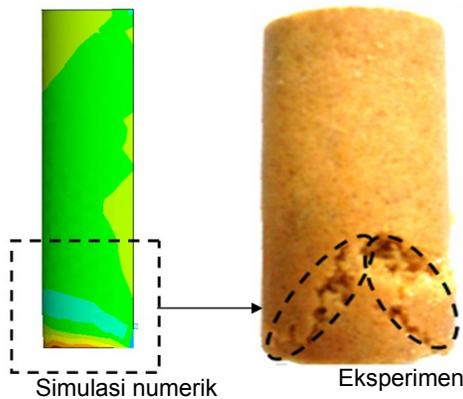
normal maksimum arah Y sekitar 0,100 MPa (tegangan tekan).

Gambar 11 menunjukkan tegangan normal arah Z tersebar lebih acak, yaitu di daerah pembebanan dan *constraint*. Seluruh tegangan normal arah Z bersifat tegangan tekan.

Tegangan normal maksimum arah Z sekitar 0,237 MPa (tegangan tekan). Kegagalan diprediksi berawal dari daerah dasar spesimen yang diberi *constraint* dan terus menjalar hingga bagian dasar spesimen uji.

Gambar 11 menyajikan distribusi tegangan Von Mises. Secara keseluruhan tegangan maksimum lebih banyak terjadi di dasar spesimen uji dimana spesimen ditumpu. Distribusi tegangan Von Mises lebih mendekati hasil yang diperoleh dari pengujian. Tegangan terdistribusi di beberapa lokasi secara acak. Ini menandakan bahwa kegagalan spesimen uji akan berawal dari titik yang berbeda. Tegangan maksimum yang diperoleh sekitar 0,186 MPa.

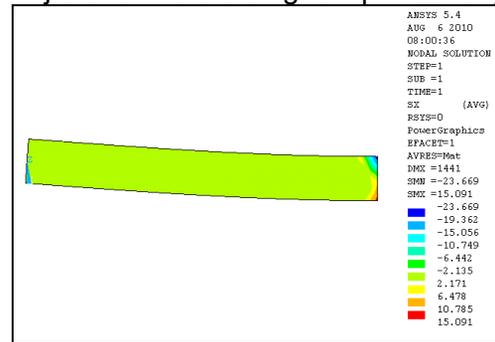
Perbandingan model retak/patah hasil simulasi numerik dan pengujian dapat dilihat pada Gbr. 12. Model retak/patah cenderung menunjukkan pola yang sama. Retak/patah yang ditimbulkan akibat kegagalan spesimen bersifat acak namun cenderung berada di daerah tertentu.



Gbr. 12 Perbandingan Model Retak/Patah Hasil Simulasi dan Eksperimen

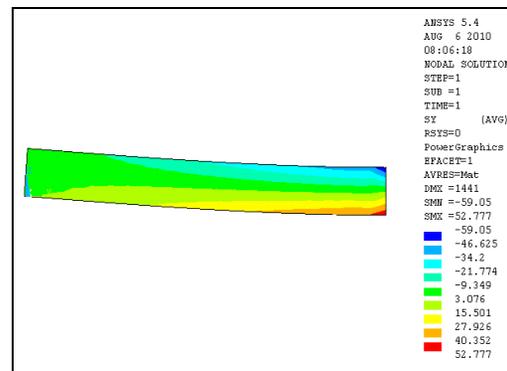
Gambar 13 menunjukkan distribusi tegangan normal arah X. Tegangan maksimum terjadi di lokasi beban diberikan. Spesimen uji *bending* memberikan respon tegangan maksimum sebesar -23,669 MPa.

Spesimen uji akan terdefleksi seperti ditunjukkan pada Gbr. 13. Defleksi maksimum terjadi tepat di lokasi beban diberikan. Kegagalan spesimen diperkirakan berawal dari daerah tersebut. Dari Gbr. 13 juga terlihat bahwa tegangan terdistribusi dari lokasi beban menjalar ke seluruh bagian spesimen uji.

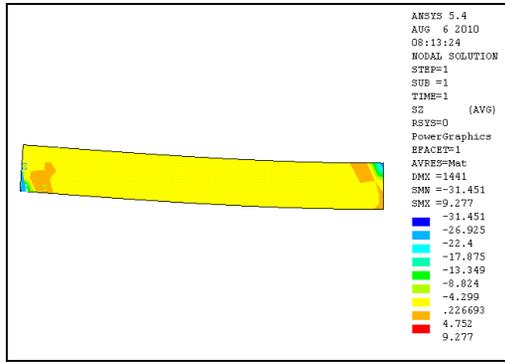


Gbr. 13 Distribusi Tegangan Normal Arah X Spesimen Uji Tekan Statik *Bending*

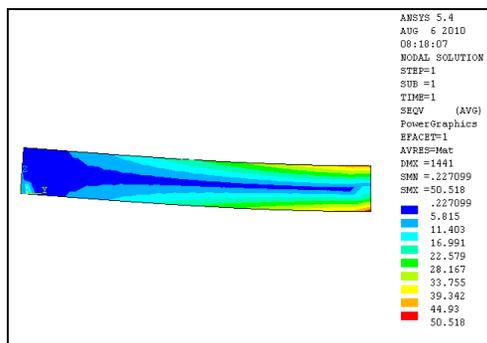
Dari Gbr. 14 dapat dilihat bahwa distribusi tegangan tersebar di daerah bagian atas dan bawah spesimen. Tegangan arah Y maksimum yang terjadi sekitar -59,05 MPa. Ini berarti spesimen uji tekan *bending* akan mengalami kegagalan di sekitar beban diberikan.



Gbr. 14 Distribusi Tegangan Normal Arah Y Spesimen Uji Tekan Statik *Bending*



Gbr. 15 Distribusi Tegangan Normal Arah Z Spesimen Uji Tekan Statik *Bending*



Gbr. 16 Distribusi Tegangan Von Mises Spesimen Uji Tekan Statik *Bending*

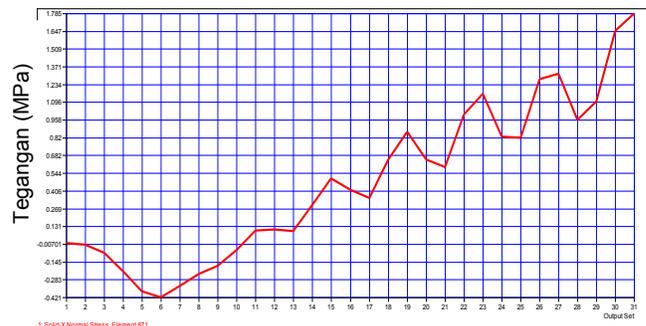
Berdasarkan Gbr. 15 dapat dilihat bahwa tegangan normal arah Z terkonsentrasi di daerah beban diberikan. Tegangan maksimum yang terjadi sekitar -31,451 MPa. Tegangan menjalar dari bagian bawah spesimen uji dan semakin besar menuju bagian atas spesimen.

Dari Gbr. 16 dapat dilihat bahwa distribusi tegangan Von Mises terkonsentrasi di sekitar beban diberikan. Tegangan maksimum yang terjadi adalah 50,518 MPa. Berdasarkan distribusi tegangan Von Mises, informasi mengenai pola penjaluran retak/patah terhadap spesimen uji dapat ditentukan. Diperkirakan kegagalan awal terjadi di daerah tegangan maksimum, yaitu di bagian bawah spesimen yang dikenai beban *bending*.

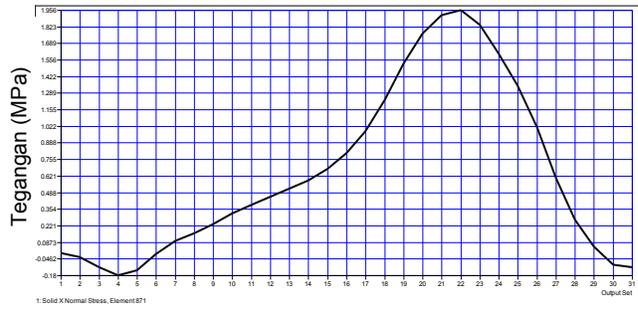
4.3 Simulasi uji tekan impact

Dari Gbr. 17 s.d. 24 dapat dilihat grafik gelombang impact terhadap spesimen uji. Untuk memudahkan analisa penjaluran gelombang impact dipilih salah satu elemen. Pemilihan elemen tersebut berdasarkan analisa tegangan maksimum hasil simulasi uji impact *bending*. Gambar 17 menunjukkan simulasi grafik penjaluran gelombang impact *bending* dalam arah X pada waktu 150 μ s. Dari grafik terlihat bahwa tegangan maksimum yang terjadi sekitar 1,75 MPa.

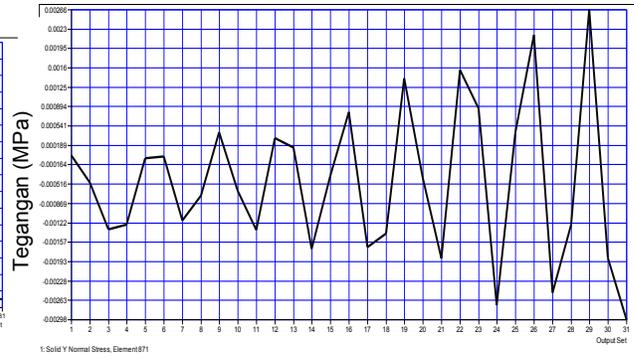
Pada waktu 300 μ s tegangan maksimum yang terjadi sekitar 1,057 MPa seperti ditunjukkan pada Gbr. 18. Dari grafik dapat dilihat bahwa penjaluran gelombang impact terjadi tegangan tarik dan tekan secara berulang-ulang. Akan tetapi, perubahan tegangan tarik dan tekan membutuhkan waktu yang lebih lama pada saat waktu impact 300 μ s.



Gbr. 17 Grafik Respon Tegangan Normal Arah X akibat Impact *Bending* pada Waktu 150 μ s

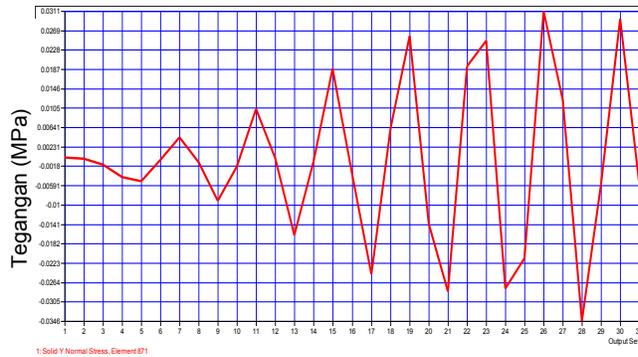


Gbr. 18 Grafik Respon Tegangan Normal Arah X akibat Impak *Bending* pada Waktu 300 μ s



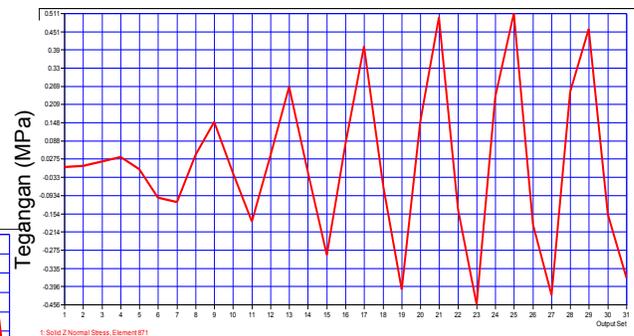
Gbr. 20 Grafik Respon Tegangan Normal Arah Y akibat Impak *Bending* pada Waktu 300 μ s

Gambar 19 menunjukkan simulasi grafik penjalaran gelombang impak *bending* dalam arah Y pada waktu 150 μ s. Dari grafik terlihat bahwa tegangan maksimum yang terjadi sekitar 0,0311 MPa.

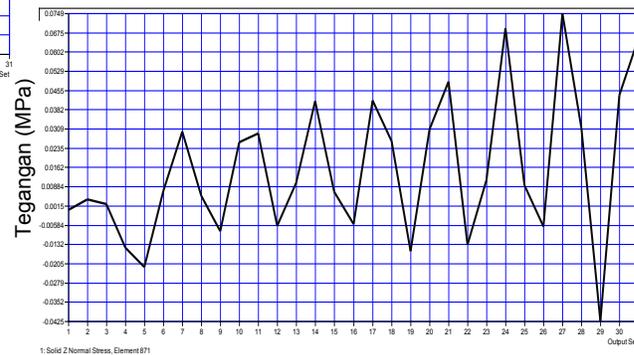


Gbr. 19 Grafik Respon Tegangan Normal Arah Y akibat Impak *Bending* pada Waktu 150 μ s

Pada waktu 300 μ s tegangan maksimum yang terjadi sekitar 0,0027 MPa seperti ditunjukkan pada Gbr. 20. Dari grafik dapat dilihat bahwa penjalaran gelombang impak terjadi tegangan tarik dan tekan secara berulang-ulang. Ini menandakan bahwa pada elemen yang dikenai beban impak terjadi tegangan yang ditransmisikan dan tegangan yang direfleksikan pada arah Y.



Gbr. 21 Grafik Respon Tegangan Normal Arah Z akibat Impak *Bending* pada Waktu 150 μ s



Gbr. 22 Grafik Respon Tegangan Normal Arah Z akibat Impak *Bending* pada Waktu 300 μ s

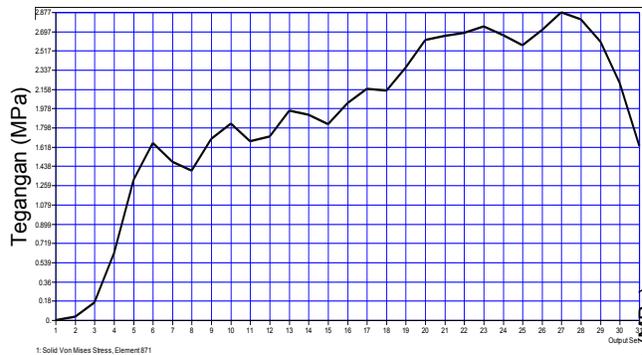
Gambar 21 menunjukkan simulasi grafik penjalaran gelombang impak *bending* dalam arah Z pada waktu 150 μ s. Dari grafik terlihat bahwa tegangan maksimum yang terjadi sekitar 0,511 MPa. Pada waktu 300 μ s tegangan maksimum yang terjadi sekitar 0,075

MPa seperti ditunjukkan pada Gbr. 22. Tegangan normal arah Z berkurang akibat adanya kenaikan waktu impact.

Gambar 23 menunjukkan simulasi grafik penjalaran gelombang impact *bending* dalam arah Z pada waktu 150 μ s. Berdasarkan grafik impact dapat dilihat penjalaran gelombang yang naik turun terhadap tegangan. Dari Gbr. 23 terlihat bahwa tegangan maksimum yang terjadi sekitar 4,162 MPa.



Gbr. 23 Grafik Respon Tegangan Von Mises akibat Impact *Bending* pada Waktu 150 μ s



Gbr. 24 Grafik Respon Tegangan Von Mises akibat Impact *Bending* pada Waktu 300 μ s

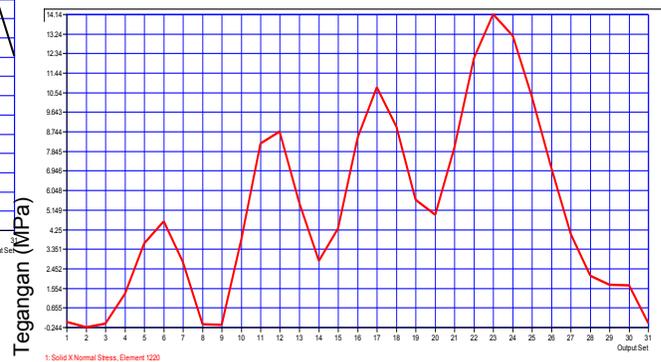
Pada waktu 300 μ s tegangan maksimum yang terjadi sekitar 0,075 MPa seperti ditunjukkan pada Gbr. 24. Tegangan Von Mises berkurang akibat adanya kenaikan waktu impact.

Sebelum tegangan impact teoritik ditentukan terlebih dahulu diketahui beberapa sifat mekanis batang. Batang input dan batang penerus merupakan dua batang yang dibuat dari material

yang sama yaitu *steel*. Beberapa sifat mekanis *steel* di antaranya adalah: $E = 190 \times 10^3$ MPa, $\rho = 7,8 \times 10^{-3}$ kg/mm³, $A = 314$ mm², dan $C_o = 4936 \times 10^3$ mm/s. Cepat rambat penjalaran gelombang *polymeric foam* diperkuat serat TKKS dapat ditentukan sebesar $202,48 \times 10^3$ mm/s. Tegangan awal (σ) diasumsikan sama dengan tekanan udara yang dihasilkan oleh alat uji impact AGC, yaitu 0,3 MPa.

Kondisi yang terjadi sewaktu melakukan eksperimen di laboratorium menunjukkan bahwa setelah spesimen menerima beban impact maka spesimen yang terletak di antara batang input dan batang insiden akan mengalami tekanan secara translasi sedangkan untuk gerakan rotasi tidak terjadi pada spesimen uji.

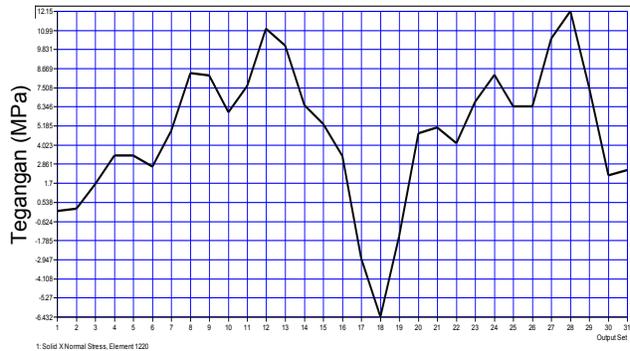
Dari Gbr. 25 s.d. 32 dapat dilihat grafik gelombang impact terhadap spesimen uji. Untuk memudahkan analisa penjalaran gelombang impact dipilih salah satu elemen, pemilihan elemen tersebut berdasarkan analisa tegangan maksimum hasil simulasi uji impact SHPB.



Gbr. 25 Grafik Respon Tegangan Normal Arah X akibat Impact SHPB pada Waktu 150 μ s

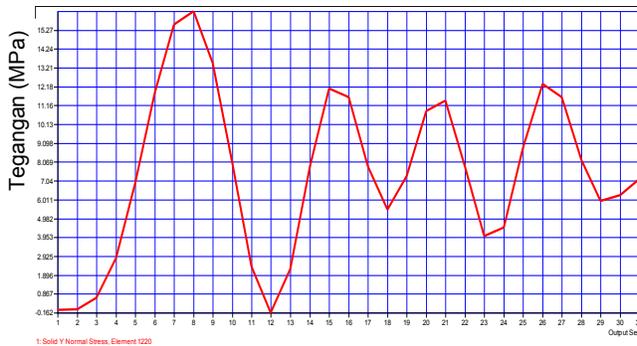
Gambar 25 menunjukkan simulasi grafik penjalaran gelombang impact SHPB dalam arah X pada waktu 150 μ s. Dari grafik terlihat bahwa tegangan maksimum yang terjadi adalah 14,14 MPa. Tegangan impact menurun pada

saat kenaikan waktu impact. Pada waktu 300 μ s tegangan maksimum yang terjadi sekitar 12,15 MPa seperti ditunjukkan pada Gbr. 26.



Gbr. 26 Grafik Respon Tegangan Normal Arah X akibat Impact SHPB pada Waktu 300 μ s

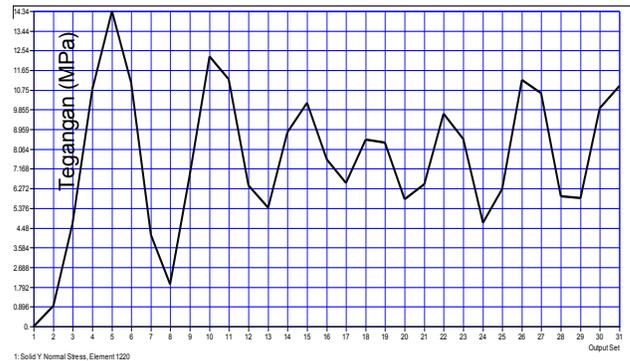
Simulasi grafik penjalaran gelombang impact SHPB dalam arah Y pada waktu 150 μ s ditunjukkan pada Gbr. 27. Dari grafik terlihat bahwa tegangan maksimum yang terjadi sekitar 15,27 MPa. Tegangan impact menurun pada saat kenaikan waktu impact. Pada waktu 300 μ s tegangan maksimum yang terjadi sekitar 14,34 MPa seperti ditunjukkan pada Gbr. 28.



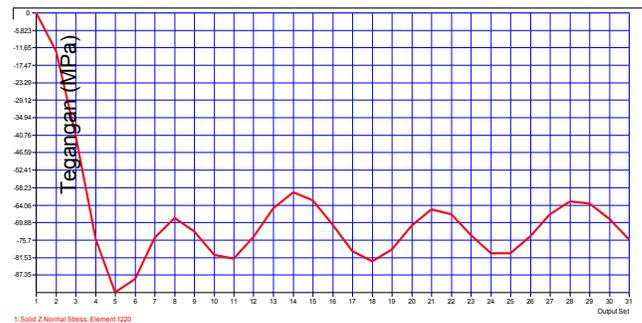
Gbr. 27 Grafik Respon Tegangan Normal Arah Y akibat Impact SHPB pada Waktu 150 μ s

Gambar 29 menunjukkan simulasi grafik penjalaran gelombang impact SHPB dalam arah Z pada waktu 150 μ s. Dari grafik terlihat bahwa tegangan

maksimum yang terjadi sekitar 93,17 MPa.

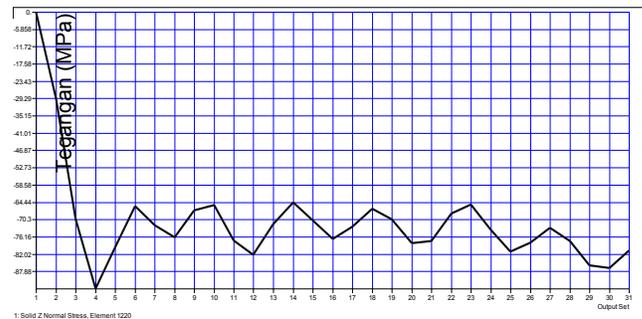


Gbr. 28 Grafik Respon Tegangan Normal Arah Y akibat Impact SHPB pada Waktu 300 μ s



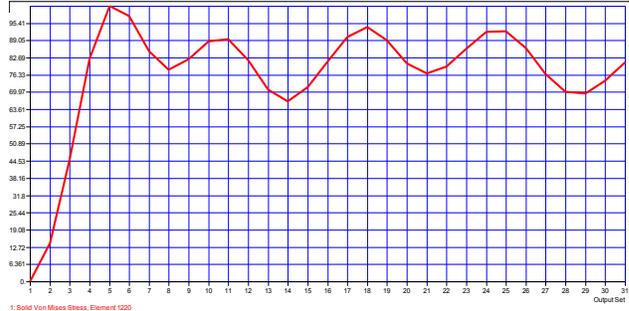
Gbr. 29 Grafik Respon Tegangan Normal Arah Z akibat Impact SHPB pada Waktu 150 μ s

Tegangan impact menurun pada saat waktu impact meningkat. Pada waktu 300 μ s tegangan maksimum yang terjadi sekitar -93,74 MPa (Gbr. 30).



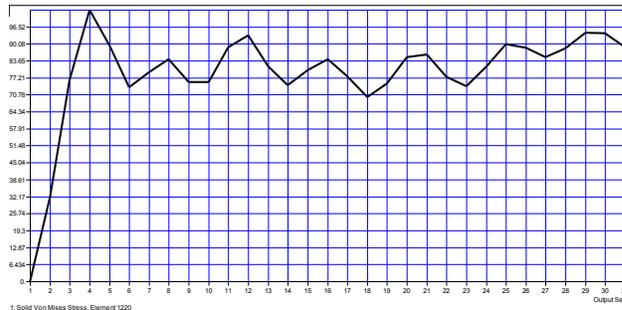
Gbr. 30 Grafik Respon Tegangan Normal Arah Z akibat Impact SHPB pada Waktu 300 μ s

Simulasi grafik penjalaran gelombang impact SHPB untuk tegangan Von Mises pada waktu 150 μ s ditunjukkan pada Gbr. 31.



Gbr. 31 Grafik Respon Tegangan Von Mises akibat Impact SHPB pada Waktu 150 μ s

Dari grafik terlihat bahwa tegangan maksimum yang terjadi sekitar 101,77 MPa. Tegangan impact menurun pada saat waktu impact meningkat. Pada waktu 300 μ s, tegangan maksimum yang terjadi sekitar 102,96 MPa seperti ditunjukkan pada Gbr. 32.



Gbr. 32 Grafik Respon Tegangan Von Mises akibat Impact SHPB pada Waktu 300 μ s

Berdasarkan simulasi numerik menggunakan software ANSYS Rel. 5.4 dan MSC/NASTRAN Rel. 4.5 diperoleh respon spesimen *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS terhadap beban tekan statik dan impact seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS memiliki respon tegangan Von Mises yang paling tinggi pada simulasi impact dengan metode

SHPB. Untuk respon tegangan arah X, respon terbesar terjadi pada simulasi impact *bending*. Respon tegangan Von Mises yang paling rendah terjadi saat simulasi uji tekan statik aksial.

Tabel 3 Respon *Polymeric Foam* Diperkuat Serat TKKS

Jenis Pembebanan	Tegangan Maksimum (MPa)			
	Arah X	Arah Y	Arah Z	Von Mises
Tekan Statik Aksial	- 0,101	- 0	0,237	0,186
Tekan <i>Bending</i>	23,66 9	59,0 5	31,45 1	50,51 8
Impact <i>Bending</i>	- 28,39	8,33 4	- 33,97	69,44
Tekan Impact (SHPB)	14,14	15,2 7	- 93,74	102,9 6

Tingginya tegangan yang direspon pada simulasi impact tekan menandakan bahwa *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS mempunyai kekuatan impact tekan yang paling baik. Sebaliknya, rendahnya respon pada simulasi tekan statik aksial menandakan bahwa *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS tidak cukup kuat menahan beban tekan statik aksial.

5. Kesimpulan

Dari hasil pengujian tekan statik aksial terhadap resin termoset, *polymeric foam (polyurethane)*, dan *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS diperoleh nilai modulus elastisitas sebesar 118,78 MPa, 0,18 MPa, dan 17,22 MPa. Tegangan tekan statik maksimum untuk respon elastisitas linier material resin termoset, *polyurethane*, dan *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS berturut-turut adalah 0,582 MPa, 0,0044 MPa, dan 0,106 MPa.

Kekuatan retak merupakan kondisi dimana material memberikan respon saat

tegangan maksimum diberikan hingga material tersebut patah. Tegangan yang direpson oleh resin termoset saat retak hingga patah adalah 1,18 MPa, *polyurethane* mengalami retak pada tegangan 0,075 MPa, dan *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS mulai retak pada tegangan 0,133 MPa.

Kegagalan resin termoset diawali dengan adanya perbesaran daerah penampang arah lateral (*barreling*), kerusakan resin termoset sangat jelas terlihat karena spesimen terbelah menjadi beberapa bagian. Untuk *polyurethane*, kerusakan di dinding struktur *foam* diakibatkan deformasi aksial dan lateral. Kerusakan dinding struktur *foam* ditandai dengan adanya lipatan-lipatan permanen. Kegagalan terhadap *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS ditandai dengan terbentuknya beberapa rongga yang membesar yang dominan menghasilkan retak prematur dimana orientasi retak menunjukkan kemiringan 45° .

Analisa terhadap distribusi tegangan *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS dilakukan melalui simulasi berbasis MEH. Tegangan normal arah X maksimum pada kondisi tekan statik aksial adalah -0,101 MPa, untuk arah Y tegangan maksimum sebesar -0,100 MPa, tegangan maksimum arah Z sebesar 0,237 MPa, dan tegangan Von Mises sebesar 0,186 MPa. *Contour* yang menunjukkan tegangan Von Mises pada simulasi tekan statik aksial mendekati hasil yang diperoleh dari hasil pengujian.

Dari hasil simulasi numerik diperoleh respon tegangan arah X maksimum *polymeric foam* yang diperkuat serat TKKS akibat beban tekan statik *bending* adalah -23,669 MPa, tegangan arah Y maksimum sebesar -59,05 MPa, tegangan arah Z maksimum sebesar -31,451, dan tegangan Von Mises maksimum adalah 50,518 MPa. Berdasarkan *contour* distribusi tegangan dapat dilihat bahwa tegangan maksimum terjadi di titik pembebanan *bending* diberikan.

Simulasi impak *bending* menunjukkan respon tegangan maksimum arah X sebesar -28,39 MPa, tegangan maksimum arah Y sebesar 8,334 MPa, tegangan maksimum arah Z sebesar -33,97 MPa, dan tegangan maksimum Von Mises sebesar 69,44 MPa. Tegangan maksimum terjadi di titik pembebanan impak *bending* sedangkan di titik tumpuan (*constraint*) tegangan hampir mendekati nol.

Hasil simulasi terhadap impak tekan menunjukkan bahwa kenaikan waktu impak menyebabkan penurunan terhadap tegangan impak. Tegangan impak arah X maksimum sebesar 14,14 MPa, tegangan impak arah Y maksimum sebesar 15,27 MPa, tegangan impak arah Z maksimum sebesar -93,74 MPa, dan tegangan impak Von Mises maksimum sebesar 102,96 MPa.

Keadaan material yang sebenarnya sulit didefinisikan terhadap pemodelan simulasi numerik. Pemodelan spesimen pada simulasi numerik dinyatakan sempurna, homogen, dan tanpa cacat. Beberapa parameter pengujian, seperti: temperatur, cacat material, kerapatan yang tidak homogen, dan sebagainya merupakan faktor yang menyebabkan terjadinya perbedaan hasil yang diperoleh dari pengujian (tekan statik aksial) dan numerik. Faktor-faktor tersebut diharapkan sebagai pertimbangan untuk pengkajian simulasi numerik selanjutnya.

Kesulitan penyelarasan kemampuan komputer dengan ukuran elemen menyebabkan pengaruh yang besar terhadap hasil simulasi. Untuk tahap penelitian selanjutnya diharapkan perangkat lunak yang digunakan mampu menghasilkan ukuran elemen yang dibutuhkan.

Daftar Pustaka

- [1] Zuhri, M.M.Y, Salit, M.S., Ismail, N. "Tensile Properties of Single Oil Palm Empty Fruit Bunch

- Fibre". *Sains Malaysiana* 38(4) (2009): 525-529.
- [2] Subhash, G, Liu, Q, dan Gao, X.-L. "Quasistatic and Dynamic Crushability Polymeric Foams in Rigid Confinement". *International Journal of Impact Engineering* 36 (2009): 1303-1311.
- [3] Mantena, P.R. dan Mann, R. "Impact and Dynamic Response of High-Density Structural Foams used a Filler Inside Circular Steel Tube" *International Journal of Composites Structures* 61 (2003): 291-302.
- [4] Subhash, G, Liu, Q, dan Gao, X.-L. "Quasistatic and High Strain Rate Uniaxial Compressive Response of Polymeric Structural Foams". *International Journal of Impact Engineering* 32 (2006): 1113-1126.