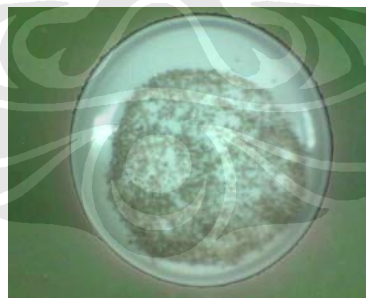


BAB IV

HASIL PENELITIAN

4.1 Hasil Preparasi Sampel

Kendala utama dalam proses penelitian ini adalah keterbatasan bahan baku, terutama serbuk kayu karet yang sengaja di-*import* dari Thailand. Dikarenakan keterbatasan tersebut, ukuran serbuk kayu yang digunakan dalam penelitian ini adalah serbuk kayu dengan ukuran 18 mesh. Melalui proses pengayakan, diperoleh ukuran serbuk kayu yang cukup homogen dengan besar tidak lebih dari 18 mesh. Dimana selanjutnya serbuk kayu di-*oven* untuk menghilangkan kandungan uap air. Dan hasil peng-*oven*-an tersebut selama 24 jam pada suhu 110°C mengurangi berat serbuk kayu sekitar 11% persen dari total berat kayu sebelum peng-*oven*-an. Penurunan berat serbuk kayu ini, diidentifikasi sebagai berkurangnya kandungan kadar uap air dalam serbuk kayu, mengingat titik didih air adalah 100°C.



Gambar 4. 1 Serbuk WPC

Setelah proses peng-*oven*-an, kontrol terhadap pengemasan serbuk kayu selama proses penimbangan dan serbuk WPC setelah proses pencampuran sampai proses peletasi, benar-benar dijaga dan diperhatikan dengan baik. Hal ini dilakukan karena sifat kayu yang sangat higroskopis dan dapat menyerap uap air dari lingkungan. Adanya kelembaban air dalam kayu akan menurunkan sifat

komposit nantinya dan mempersulit proses pembuatan komposit tersebut. Namun, pellet WPC hasil peletasi banyak terdapat rongga-rongga (gambar 4.2).



Gambar 4. 2 Pellet WPC memiliki permukaan yang kasar

Hal ini menunjukkan banyaknya uap air dan udara yang terperangkap dalam pellet selama proses peletasi. Sehingga dapat disimpulkan bahwa kandungan uap air dalam serbuk WPC masih cukup banyak. Ditambah lagi, ekstrusi pada proses peletasi tidak dilengkapi dengan *venting* (sistem pengeluaran udara) yang baik.



Gambar 4. 3 Perbedaan warna pada pellet WPC (a) dan spesimen hasil injeksi (b)

Selain itu, hasil peletasi menunjukkan adanya kontaminasi terhadap pellet WPC. Hal ini terlihat dari perubahan warna yang cukup signifikan. Perpaduan PP yang *translucent* (semi-opak) dengan warna serbuk kayu, umumnya menghasilkan pellet WPC dengan warna coklat, sama seperti warna serbuk WPC sebelum dipeletasi (gambar 4.1). Namun seperti terlihat pada gambar 4.3, pellet WPC untuk sampel F2, penambahan 5%wt serbuk kayu, terlihat berwarna putih gading. Sedangkan sampel F4, penambahan 20%wt serbuk kayu, berwarna putih kecoklatan yang opak.

4.2 Hasil DSC (*Differential Scanning Calorimeter*)

Pengujian DSC dilakukan dengan dua kali pemanasan sehingga diperoleh dua titik lebur (T_m). Pemanasan pertama bertujuan untuk penghilangan sejarah pemanasan (*historical thermal*) yang terjadi selama pemrosesan sebelumnya. Data yang dipakai sebagai data pembanding adalah nilai titik lebur yang kedua. Hal ini karena proses T_{m2} diperoleh dari hasil pemanasan dan pendinginan dengan laju perubahan yang konstan yang dilakukan di dalam mesin DSC sehingga tegangan dan relaksasi yang terjadi akibat perubahan suhu, relatif stabil. Pada proses pendinginan yang kedua diperoleh suhu kristalisasi (T_{kris}). Sebenarnya DSC juga dapat menganalisa temperatur *glass* (T_g). Namun, proses pendinginan yang dilakukan hanya sampai temperatur ruang sehingga tidak terdeteksi T_g -nya sebab T_g PP berada dibawah 0°C .

Berdasarkan hasil pengujian DSC di bawah, dapat dilihat bahwa penambahan serbuk kayu mengakibatkan peningkatan suhu leleh, demikian pula yang terjadi pada suhu kristalisasi. Semakin banyak persentase serbuk kayu, maka suhu leleh dan suhu kristalisasi semakin meningkat. Dari hasil DSC tersebut juga terlihat bahwa peningkatan suhu kristalisasi sebanding dengan kenaikan suhu leleh. Berikut ialah tabel hasil pengujian DSC:

Tabel 4. 1 Hasil pengujian DSC

Kode sampel	Variabel	DSC		
		T_{m1}	T_{m2}	Kristalisasi
	% Wood	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$
F1	0	159.9	156.2	108.3
F2	5	161.0	156.9	111.8
F3	10	161.2	159.4	116.8
F4	20	161.3	157.5	115.5
F5	30	160.8	159.7	117.9

4.3 Hasil MFR (*Melt Flow Rate*)

Pengujian *Melt Flow Rate* atau *Melt Flow Index* dilakukan untuk mengetahui kecepatan aliran WPC dalam keadaan leleh. Data yang diperoleh dari pengukuran MFR ini menggambarkan derajat kekentalan (viskositas) WPC.

Pada pengukuran *Melt Flow Index* diupayakan agar tidak ada gelembung udara yang terperangkap dalam lelehan polimer ketika pengukuran berlangsung,

karena akan mempengaruhi nilai MFR yang diperoleh. Namun, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya dan seperti yang terlihat pada gambar 4.2 di atas, pellet WPC mengandung banyak udara yang terperangkap sehingga pengambilan data MFR menjadi begitu sulit karena udara tersebut bergerak ke atas sambil mendorong material menyembul ke atas keluar dari alat MFR. Selain itu, lelehan WPC menghasilkan suara letupan setelah keluar dari lubang *orifice*. Hal ini diidentifikasi sebagai udara yang terdorong keluar melalui lubang *orifice*.

Pada tabel 4.2, terlihat laju keluaran lelehan WPC (sampel F2 dan F3) lebih cepat dibandingkan PP murni (sampel F1). Hal ini membuat MFR F2 dan F3 lebih besar daripada F1. Sedangkan nilai MFR untuk sampel F4 dan F5 justru lebih kecil daripada sampel F1. Hasil ini menunjukkan terjadinya dua kecenderungan: penambahan kadar serbuk kayu dapat mengakibatkan nilai MFR WPC menurun atau justru meningkat. Berikut ialah tabel hasil pengujian MFR:

Tabel 4. 2 Hasil pengujian MFR

Kode sampel	Variabel	MFI
	% Wood	gr/10'
F1	0	8.1
F2	5	9.0
F3	10	8.9
F4	20	6.2
F5	30	7.4

4.4 Hasil Uji Tarik

Data yang diperoleh dari pengujian tarik adalah kurva tegangan-regangan, dimana dari kurva tersebut dapat dihitung nilai kekuatan tarik, ketangguhan, keuletan, dan kekakuan. Berdasarkan hasil pengujian tarik terlihat bahwa penambahan komposisi serbuk kayu membuat nilai kekakuan WPC semakin meningkat dan dibutuhkan tegangan yang lebih besar untuk mencapai titik luluhnya. Pertambahan panjang yang terjadi, menunjukkan kecenderungan yang semakin kecil, hingga titik luluh, walaupun perubahan nilainya tidak berpola.

Pengaturan kecepatan penarikan pada pengujian tarik ini cukup besar untuk skala WPC, yaitu 50 mm/menit. Akibatnya, proses pemuluran tidak jelas terlihat

pada kurva tegangan regangan dan spesimen langsung patah setelah beberapa saat melewati titik luluhnya. Berikut ialah tabel hasil pengujian tarik:

Tabel 4. 3 Hasil pengujian tarik

Kode sampel	Variabel	Uji Tarik		
		Et	σ_v	ϵ_v
	% Wood	MPA	MPA	%
F1	0	593	31.9	12.0
F2	5	606	24.3	8.5
F3	10	650	33.3	11.0
F4	20	786	34.1	5.8
F5	30	828	34.0	5.7

4.5 Hasil Uji Fleksural

Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan persentase serbuk kayu membuat nilai E_H semakin meningkat. Kecenderungan yang sama juga terlihat pada hasil E_{Sec} yang mengalami kenaikan seiring penambahan persentase serbuk kayu. Berikut ialah tabel hasil pengujian fleksural:

Tabel 4. 4 Hasil pengujian fleksural

Kode sampel	Variabel	Uji Fleksural	
		E_H	E_{Sec}
	% Wood	MPA	MPA
F1	0	1130	1130
F2	5	1300	1340
F3	10	1490	1520
F4	20	1850	1900
F5	30	2340	2260

4.6 Hasil Impak Bertakik

Metode Izod merupakan metode impak dengan sampel bertakik. Hal ini pada dasarnya ingin mensimulasikan kondisi sampel yang memiliki inisial crack. Hasil pengujian membuktikan bahwa penambahan serbuk kayu justru menurunkan kekuatan impak dan modulus kekakuan fleksuralnya. Semakin banyak jumlah serbuk kayu yang ditambahkan membuat harga impaknya semakin menurun, begitu juga dengan modulus kekakuan fleksuralnya. Berikut ialah tabel hasil pengujian impak bertakik:

Tabel 4. 5 Hasil pengujian impak

Kode sampel	Variabel	Izod Impact	
		W	ak-C
	% Wood	J	J/m
F1	0	0.08452	6.66
F2	5	0.07273	5.73
F3	10	0.05416	4.28
F4	20	0.07366	5.80
F5	30	0.04625	3.64

4.7 Hasil Kekerasan

Tabel 4. 6 Hasil pengujian kekerasan

Kode sampel	Variabel	Pengujian Rockwell R			Uji Kekerasan
		titik 1	titik 2	titik 3	
	% Wood	HRR	HRR	HRR	HRR
F1	0	85.3	85.6	84.7	85.2
F2	5	91.5	94.1	91.6	92.4
F3	10	95.5	92.6	93.9	94.0
F4	20	95.6	94.0	93.6	94.4
F5	30	99.1	100.3	100.7	100.0

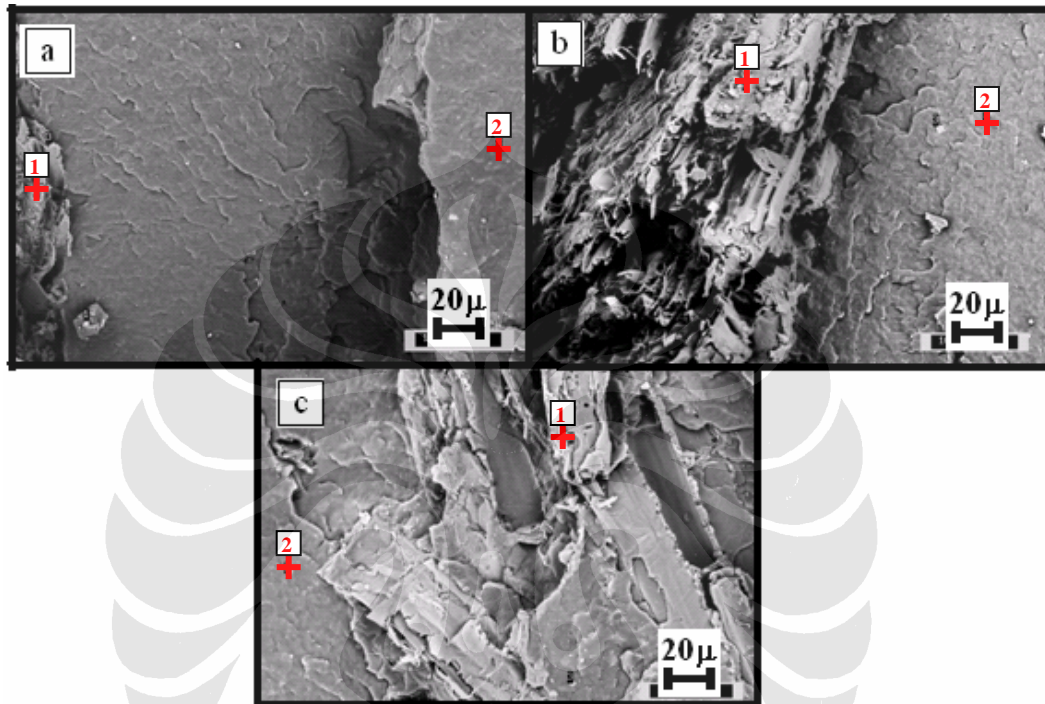
Data kekerasan yang diperoleh sangat fluktuatif, namun yang tertera pada tabel di atas merupakan hasil eliminasi beberapa data agar standar deviasi yang terjadi tidak terlalu besar. Berdasarkan hasil pengujian kekerasan, diperoleh nilai kekerasan yang semakin naik setara dengan persentase serbuk kayu yang ditambahkan.

4.8 Hasil EDX

EDX dipakai untuk mengetahui komposisi kimia dari sampel yang terkontaminasi. Sampel yang diuji EDX adalah F4 dan F2, yaitu sample yang terkontaminasi, sedangkan F3 sebagai data pembandingan. Tiap sampel ditembak di 2 titik, yaitu pada serbuk kayu, dan pada matriks yang dicurigai mengandung kontaminan.

Sebagian besar kandungan kimia dari serbuk kayu dan PP adalah karbon, oksigen, dan hidrogen. Unsur lain yang terdeteksi sebagai kandungan kimia pada F2 adalah titanium, dianggap sebagai kontaminan. Sedangkan, kandungan kimia

pada F4 hanya terdeteksi karbon dan oksigen saja. Dari hasil EDX menunjukkan bahwa kandungan karbon pada serbuk kayu jauh lebih sedikit dibandingkan pada matriks PP. Sebaliknya kandungan oksigen pada serbuk kayu lebih banyak daripada kadar oksigen dalam matriks. Hasil penembakan BSE tersebut dengan metode analisis EDX diperoleh komposisi kimia di masing-masing titik, seperti tertera pada tabel berikut:



Gambar 4. 4 Titik penembakan EDX pada serbuk kayu dan matriks WPC sample F2 (a), F3 (b), dan F4 (c) yang dianalisis melalui SEM menggunakan detektor *Back Scatter Electron*.

Tabel 4. 7 Hasil analisis EDX

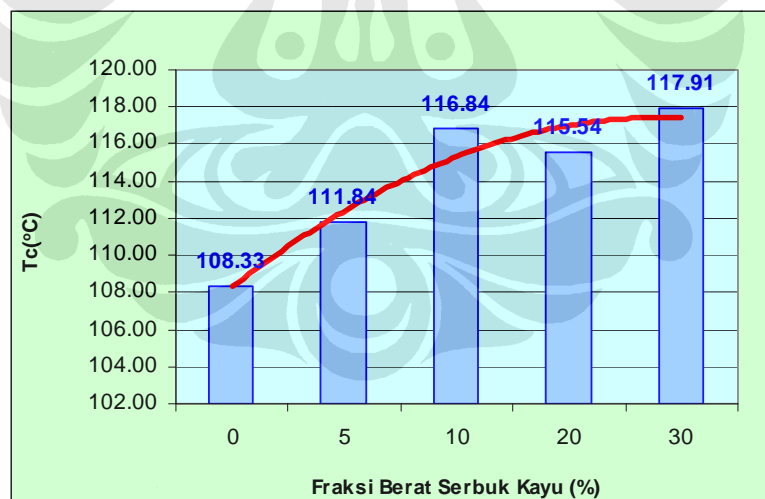
kandungan kimia	Titik Penembakan sampel F2		Titik Penembakan sampel F3		Titik Penembakan sampel F4	
	serbuk kayu	matriks PP	serbuk kayu	matriks PP	serbuk kayu	matriks PP
	% wt	% wt	% wt	% wt	% wt	% wt
karbon	30.97	80.63	32.52	74.66	32.13	80.20
oksigen	69.03		67.48	25.34	63.47	19.80
titanium		19.37				

BAB V

PEMBAHASAN DAN DISKUSI

5.1 Pengaruh Persentase Berat Serbuk Kayu Terhadap Perubahan Sifat Thermal WPC

Pada pengujian ini, perubahan sifat thermal diamati dengan menggunakan *Differential Scanning Calorimeter* (DSC). Perubahan sifat yang dimaksud adalah T_{kris} dan T_m . Sebenarnya, ada satu temperatur transisi lagi yang cukup menarik untuk diamati sebagai ciri khas material polimer, yaitu T_g . Namun, perubahan nilai T_g tidak dapat dideteksi karena proses pendinginan dalam pengujian ini dilakukan hanya sampai temperatur kamar ($\pm 25^\circ\text{C}$), padahal nilai T_g PP umumnya berada dibawah 0°C . Jadi perubahan sifat thermal yang akan dibahas hanya T_{kris} dan T_m . Berikut adalah grafik hasil pengujian DSC:

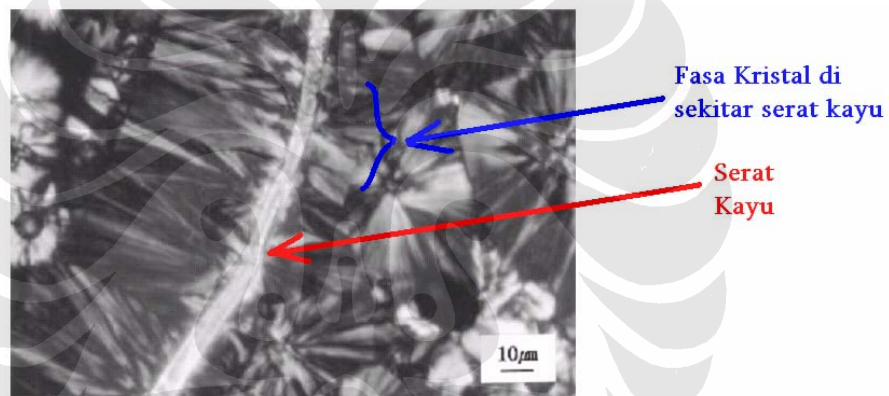


Gambar 5. 1 Grafik pengaruh persentase serbuk kayu terhadap suhu kristalisasi

Hasil pengujian DSC tersebut menunjukkan bahwa semakin besar persentase serbuk kayu yang ditambahkan dalam WPC, menyebabkan semakin meningkatnya T_{kris} WPC. Menurut beberapa literatur^[44,45], hal ini berkaitan dengan sifat serbuk kayu yang dapat merangsang terbentuknya inti kristal. Dengan demikian, penambahan serbuk kayu dapat meningkatkan kristalinitas. Inti

tersebut akan menginisiasi terbentuknya kristal dan menjadi pusat pertumbuhan kristal, dimana selanjutnya akan terus berkembang membentuk spherulit.

Pada daerah pertemuan antara serbuk kayu dengan matriks, akan muncul fasa transkristalin yang mengelilingi serbuk kayu ketika WPC leleh didinginkan. Fasa kristalin ini tumbuh secara tegak lurus terhadap permukaan serbuk kayu. Pertumbuhan ini berlanjut membentuk spherulit.^[44] Namun, sampai saat ini, belum dapat diidentifikasi secara pasti mekanisme kristalisasi PP di permukaan serbuk kayu. Menurut Soo Jin-Son *et al* (2000), terjadinya kristalisasi di *interface* ini disebabkan oleh adanya kesamaan jarak konfigurasi (*sufficiently similar spacing configuration*) antara cincin piranos yang terdapat pada selulosa dengan grup metil pada PP. Konfigurasi inilah yang menstimulasi proses pengintian atau nukleasi^[44]. Namun, tidak ada pembuktian terhadap teori ini.



Gambar 5. 2 Struktur kristal terbentuk disekitar permukaan serat kayu, diamati dengan Mikroskop optik.^[44]

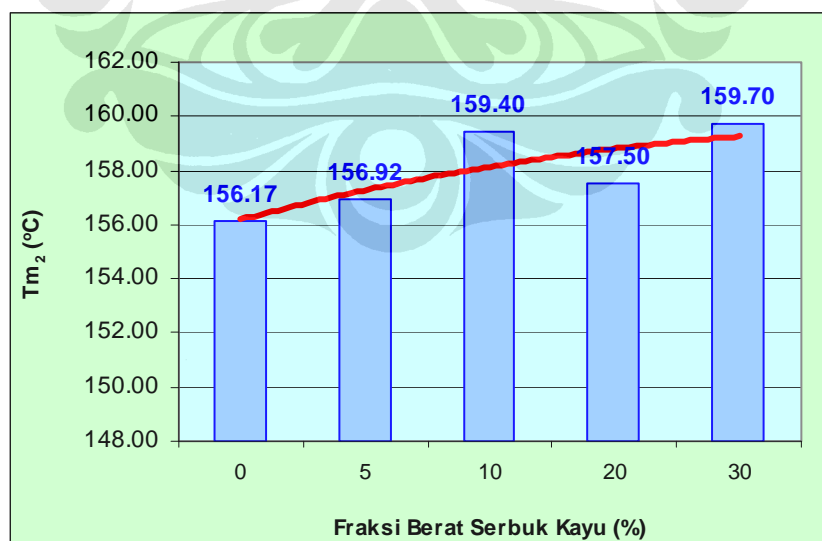
Dampak dari semakin banyaknya persentase serbuk kayu yang dipakai dalam WPC adalah semakin banyaknya inti kristal yang terbentuk. Dengan demikian, derajat kristalinitasnya akan meningkat. Semakin banyaknya kristal yang terbentuk, jarak antara satu kristal dengan yang lainnya semakin berdekatan, sehingga ukuran kristal yang terbentuk akan semakin kecil.^[46] Pengaruh kristalisasi ini akan sangat mempengaruhi karakteristik mekanik WPC nantinya.

Nukleasi berlangsung secara endotermis, sedangkan proses pertumbuhan kristal bersifat eksotermis. Selama proses kristalisasi, gibbs energy pada saat pertumbuhan kristal lebih besar dibandingkan dengan ketika proses nukleasi, sehingga secara keseluruhan, kristalisasi dianggap bersifat eksotermis, dimana nilai gibbs energy atau energy bebasnya bernilai negatif.^[45] Dengan kata lain,

kristalisasi terjadi dengan cara mengeluarkan energi kalor keluar sistem. Maka meningkatnya derajat kristalinitas tersebut mengakibatkan meningkatnya suhu kristalisasi.

Selain itu, kehadiran serbuk kayu itu sendiri juga merupakan faktor penyebab meningkatnya kristalisasi. Serbuk kayu akan membatasi mobilitas rantai polimer dan menyebabkan kristalisasi terjadi pada temperatur yang lebih tinggi saat proses pendinginan.^[45]

Derajat kristalinitas ini juga yang mempengaruhi temperatur leleh WPC. Temperatur leleh merupakan temperatur transisi perubahan fasa secara makro, dari fasa *rubbery* menjadi *viscos liquid*. Dimana perubahan ini terjadi dengan cara merombak struktur kristalin menjadi *amorf* atau acak. Semakin tinggi derajat kristalinitas berarti semakin banyak fasa kristalin yang terbentuk. Sehingga dibutuhkan banyak energi untuk merombak struktur teratur dari kristalin menjadi struktur acak. Energi tersebut disuplai dari energi panas. Dengan demikian, semakin besar persentase serbuk kayu menyebabkan semakin banyak fasa kristal yang terbentuk, dan dibutuhkan energi kalor yang banyak untuk merubah fasa kristalin menjadi fasa amorf. Oleh sebab itu, semakin banyak penambahan serbuk kayu, maka temperatur lelehnya semakin tinggi. Hal ini terlihat dari kecenderungan (*trendline*) pada grafik hasil MFR berikut:



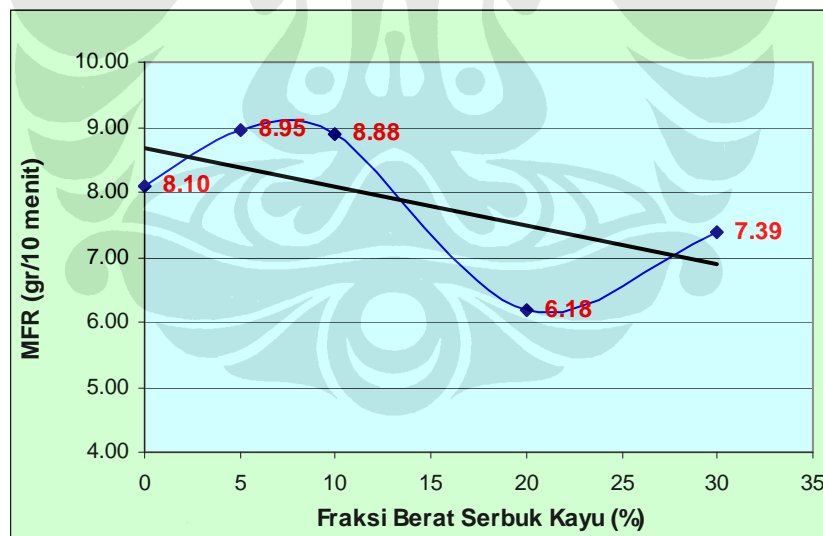
Gambar 5. 3 Grafik pengaruh persentase serbuk kayu terhadap suhu leleh

Penambahan PPMA sebagai zat penggabung juga memberi pengaruh terhadap karakteristik termal WPC. Seperti telah dijelaskan pada sub-sub-bab

2.5.3, Maleat Anhidrat pada PPMA akan membentuk *ester linkage* dengan serbuk kayu, yaitu dengan cara berikatan secara kovalen dengan gugus hidroksil. Dan juga sekaligus berikatan hidrogen dengan gugus hidroksil lainnya pada lignin dan selulosa dalam serbuk kayu, seperti terlihat pada gambar 2.13. Reaksi kimia tersebut membentuk energi ikatan yang sangat kuat sehingga stabilitas termalnya meningkat.^[9] Semakin banyak serbuk kayu yang ditambahkan ke dalam matriks, maka semakin luas daerah *interface*-nya, sehingga ikatan yang terbentuk semakin banyak dan stabilitas termalnya akan semakin baik.

Pada Gambar grafik 5.1 dan 5.3 terlihat adanya penyimpangan data pada sampel F4 dengan 20% wt serbuk kayu. Hal ini berkaitan dengan perubahan warna yang terjadi, seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya. Penyimpangan ini diidentifikasi sebagai akibat kontaminasi. Hal ini akan dibahas lebih detail pada sub-bab selanjutnya.

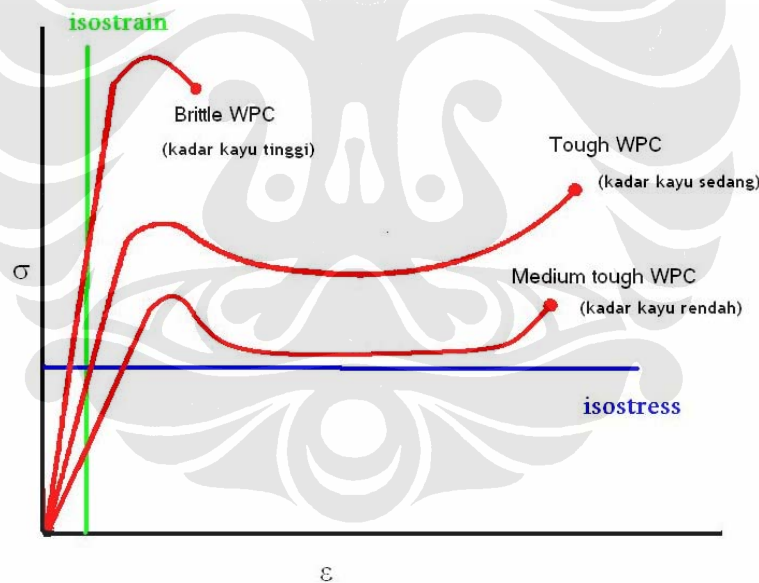
5.2 Pengaruh Persentase Berat Serbuk Kayu Terhadap Sifat Kemampuan Aliran WPC



Gambar 5. 4 Grafik pengaruh persentase serbuk kayu terhadap MFR

Berdasarkan *trendline* pada grafik hasil pengujian MFR di atas, terlihat bahwa semakin banyak persentase serbuk kayu yang ditambahkan pada WPC cenderung menurunkan nilai MFR-nya. Hal ini sejalan dengan literatur yang menyatakan bahwa semakin banyak penambahan serbuk kayu, maka viskositas dan modulus elastisnya akan semakin meningkat.^[47,48] Sesuai dengan sifat

Prinsip ini berlaku sebaliknya, jika lelehan WPC dikenakan beban (σ) yang sama besar (*isostress*), maka tegangan geser yang terjadi semakin kecil, seiring dengan semakin banyaknya penambahan fraksi berat serbuk kayu. Hal ini dikarenakan pengaruh adanya serbuk kayu yang berfungsi sebagai penghambat yang memperlambat laju aliran lelehan matriks. Akibatnya nilai MFR-nya semakin kecil karena debit keluaran lelehan WPC semakin sedikit. Dari sini dapat ditarik kesimpulan yang sama dengan literatur, bahwa semakin banyak penambahan fraksi berat serbuk kayu, maka komposit menjadi semakin *viscos* sehingga kemampu-alirannya semakin rendah.



Gambar 5. 5 Grafik ilustrasi *stress* versus *strain*^[9]

Akan tetapi, tidak semua data menunjukkan kecenderungan yang sama. Seperti terlihat pada garfik 5.3, nilai MFR untuk sampel F2 dan F3, justru menyatakan sebaliknya, penambahan serbuk kayu mengakibatkan semakin meningkatnya nilai MFR. Kecenderungan ini terjadi akibat adanya udara yang terperangkap (*bubble trap*). Seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, bahwa ekstrusi peletasi menghasilkan pellet yang memiliki banyak rongga.

Rongga-rongga ini secara otomatis terisi oleh udara. Kehadiran udara ini mempersulit pengujian MFR dan membuat nilai MFR yang diperoleh menjadi kurang valid.

Setelah matriks WPC meleleh akibat pemanasan, *bubble trap* akan semakin mudah bergerak. Jika diberi pembebanan, *bubble trap* dipaksa keluar bersama WPC. Karena udara memiliki ruang gerak yang cukup besar, maka lelehan WPC akan semakin mudah mengalir melalui orifice. Alhasil, nilai MFR WPC cenderung lebih tinggi dari nilai yang seharusnya. Keberadaan udara ini juga terlihat dari hasil keluaran lelehan WPC dari *orifice* yang menghasilkan cacat berupa permukaan yang kasar, seperti terlihat pada gambar berikut:



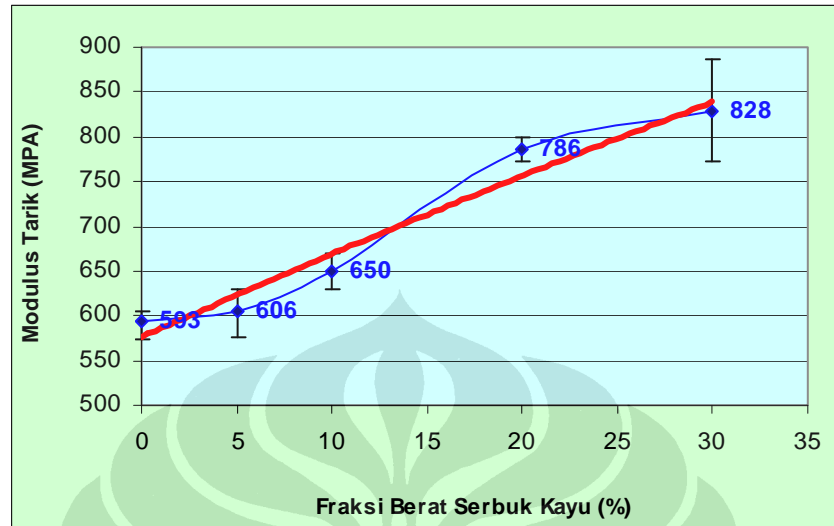
Gambar 5. 6 Hasil lelehan WPC hasil pengujian MFR

Dari gambar di atas, terlihat bahwa permukaan WPC tidak sehalus permukaan hasil MFR PP murni (sampel F1). Permukaan kasar ini diidentifikasi sebagai rongga terbuka tempat *bubble trap*. Padahal seharusnya, permukaan tiap formulasi harus sama halus seperti permukaan hasil MFR PP murni.

Bubble trap seharusnya tidak terjadi dan dapat dihindari dengan cara mempertinggi kontrol pengemasan dan memperpendek jeda produksi. Maksudnya adalah mengemas WPC secara ketat, baik sewaktu dalam bentuk pellet maupun serbuk. Selain itu, setelah tahapan proses yang satu selesai, sebaiknya langsung diteruskan ke tahap proses selanjutnya. Hal tersebut sangat perlu dilakukan untuk meminimalisir kemungkinan kontak antara serbuk atau pellet WPC dengan udara luar. Solusi lain untuk mengatasi masalah ini adalah menggunakan alat uji MFR yang telah dilengkapi alat *venting* udara, sehingga udara dalam bentuk *bubble trap* dapat dikeluarkan sewaktu proses pengujian MFR berlangsung dan tidak mempengaruhi hasil data yang diperoleh.

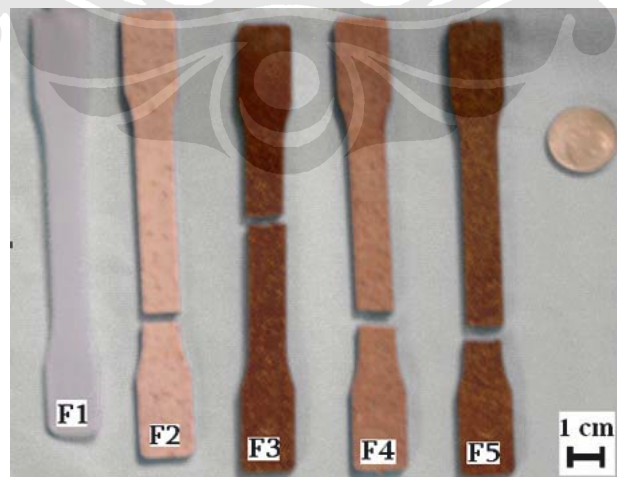
5.3 Pengaruh Persentase Berat Serbuk Kayu Terhadap Sifat Mekanik WPC

Kekuatan Tarik



Gambar 5. 7 Grafik pengaruh persentase serbuk kayu terhadap modulus tarik

Berdasarkan grafik diatas menunjukkan bahwa penambahan serbuk kayu meningkatkan kekuatan tarik WPC. Serbuk kayu dapat menyerap energi pembebanan sehingga, ketika diberi pembebanan, diperlukan energi lebih banyak untuk memulai terjadinya retak pada WPC. Oleh sebab itu, kekuatan mekanik WPC sangat bergantung pada kemampuan matriks untuk mentransfer tegangan hasil pembebanan dari luar, ke pengisi.^[48]



Gambar 5. 8 Spesimen uji tarik yang telah terdeformasi dan patah

Ketika energi yang diterima PP telah memungkinkan terjadinya retak, maka retak dengan cepat akan merambat sampai terjadi failure. Hal ini dikarenakan PP

bersifat cukup getas. Jika terdapat retak maka perambatannya akan terjadi dengan sangat mudah. Sedangkan dengan penambahan serbuk kayu, penjalaran retak tidak mudah terjadi. Untuk melewati serat serbuk kayu diperlukan energi tambahan untuk menarik serat keluar dari matriks (*debonding* dan *pull-out*).^[49]

Selain itu, ikatan yang terjadi antara matriks dengan bahan pengisi, cukup kuat. Hal ini terlihat pada hasil SEM (pembahasan lebih detail pada sub-bab selanjutnya). Semakin bagus interaksi yang terjadi antara, maka sifat mekanik WPC akan semakin tinggi.

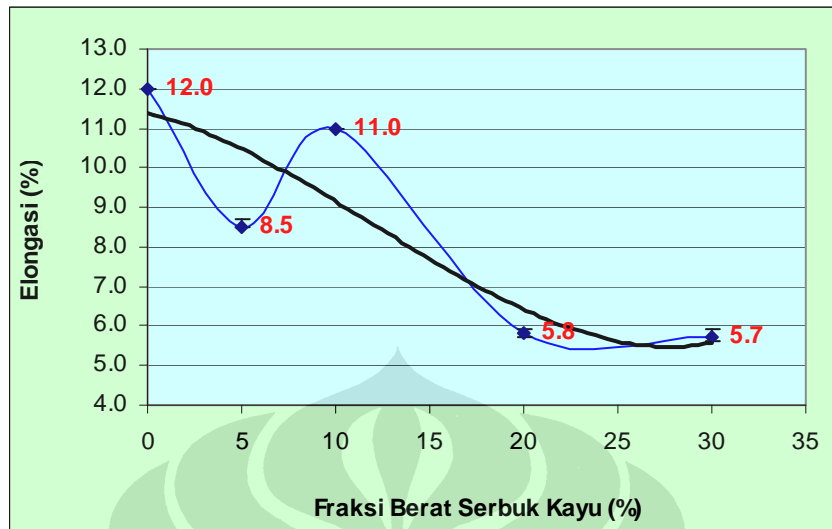
Walaupun sebenarnya antara PP dengan serbuk kayu memiliki perbedaan polaritas yang cukup tinggi, namun penambahan 5%wt PPMA memperbaiki karakteristik *interface* diantara keduanya. Seperti telah dijelaskan pada sub-sub-bab 2.5.3, Maleat Anhidrat pada PPMA akan membentuk *ester linkage* dengan serbuk kayu, yaitu dengan cara berikatan secara kovalen dengan gugus hidroksil. Dan juga sekaligus berikatan hidrogen dengan gugus hidroksil lainnya pada lignin dan selulosa dalam serbuk kayu, seperti terlihat pada gambar 2.13. Ditambah lagi, bagian PP pada PPMA akan dijerat oleh matriks PP sehingga terjadi ikatan mekanik (*interlocking*).^[28] Reaksi kimia tersebut membentuk energi ikatan yang sangat kuat. Akibatnya ketika dikenai pembebanan, dibutuhkan energi yang lebih besar untuk memutuskan ikatan tersebut, atau dengan kata lain, *interface*-nya semakin kuat.

Karena *coupling agent* dapat berfugsi dengan baik, maka ikatan antara matriks dengan pengisi akan cukup kuat. Sehingga dibutuhkan energi lebih banyak lagi untuk menarik serat keluar dari matriks. Dimana semakin banyak serbuk kayu yang ditambahkan ke dalam matriks, maka semakin luas daerah *interface*-nya, sehingga ikatan yang terbentuk semakin banyak dan sifat mekaniknya semakin meningkat.

Efek kristalisasi juga meningkatkan kekuatan tarik. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, serbuk kayu dapat meningkatkan derajat kristalinitasnya.^[44] Akibatnya fasa kristalin yang terbentuk akan semakin banyak dibandingkan fasa amorf. Dengan demikian, kekuatan tarik material WPC akan meningkat.

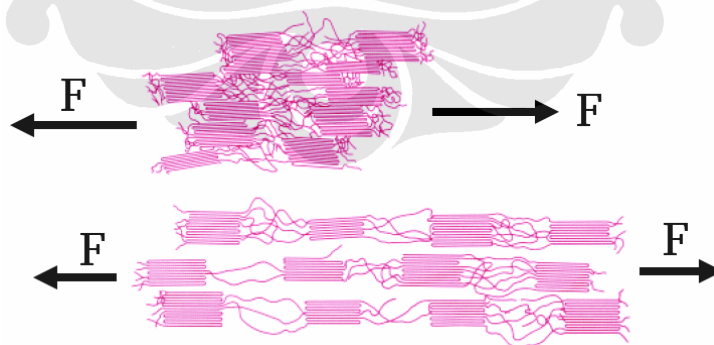
Tetapi, dampak buruknya WPC menjadi semakin getas. Sehingga penambahan serbuk kayu ini cenderung menurunkan persentase elongasi. Ketika

diberi pembebanan tarik, WPC menjadi lebih cepat patah. Hal ini terlihat dari grafik hasil pengujian tarik diatas (gambar 5.9)



Gambar 5. 9 Grafik pengaruh persentase serbuk kayu terhadap elongasi

Ketika Polimer semikristalin dikenai pembebanan tarik, elongasi diawali dari bagian amorf. Fasa amorf akan meregang dan tertarik secara paksa membentuk susunan sejajar^[9], seperti ditunjukkan pada gambar 5.10. Dengan demikian, semakin banyak fasa amorf maka elongasinya akan semakin besar. Sedangkan PP derajat kristalinitasnya sangat tinggi, yaitu lebih besar dai 90%. Hal ini berarti bahwa fasa amorf yang dimiliki PP relatif sedikit sehingga elongasi yang terjadi tidak terlalu besar.

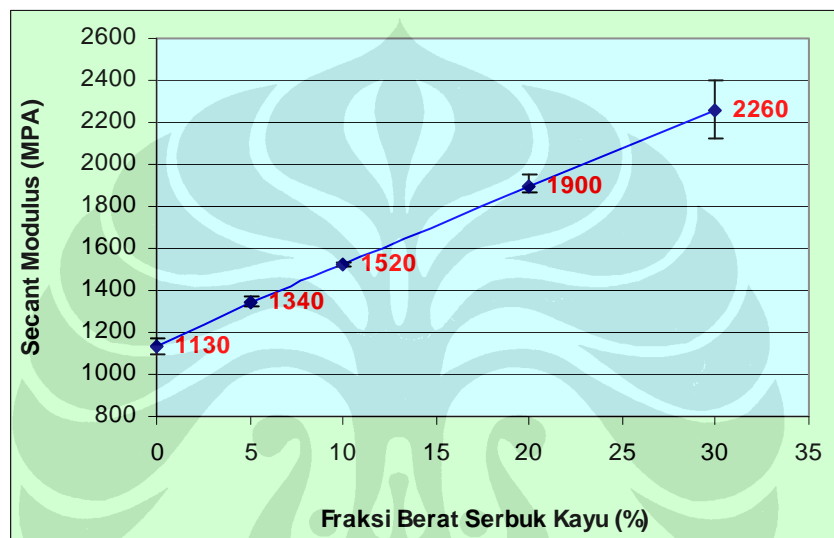


Gambar 5. 10 Mekanisme deformasi material semikristalin; ketika diberi pembebanan tarik, terjadi peregangan pada fasa amorf. ^[9]

Adanya penambahan serbuk kayu, maka pemuluran tersebut menjadi terhalangi. Ketika struktur amorf meregang, peregangan tersebut akan menumbuk serbuk kayu sehingga pemuluran terhenti dan elongasi yang terbentuk relatif lebih

pendek. Mekanisme ini juga dapat menjelaskan mengapa karakteristik mekanik WPC semakin meningkat, yaitu karena untuk melewati serbuk kayu dibutuhkan energi yang lebih besar. Ketika pemuluran dan perambatan retak menabrak serbuk kayu, prosesnya akan berhenti sejenak sampai diperoleh energi yang cukup untuk melalui atau bahkan memotong serbuk kayu dan melanjutkan proses pemuluran dan perambatan retak tadi.

Kekuatan Fleksural



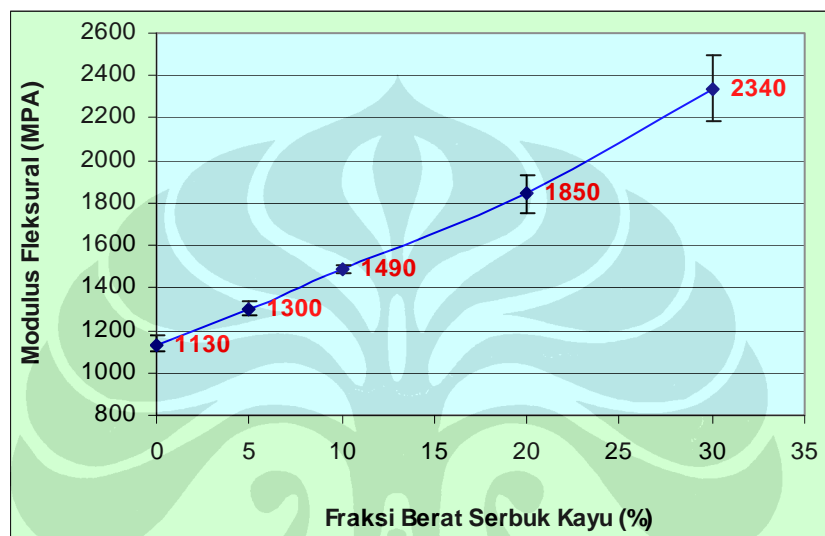
Gambar 5. 11 Grafik pengaruh persentase serbuk kayu terhadap kekuatan flexural

Efek peningkatan kekuatan dengan cara penambahan serbuk kayu, tergambar dengan jelas pada hasil pengujian fleksural. Semakin banyak fraksi serbuk kayu yang ditambahkan, membuat kekuatan secant modulusnya semakin naik secara konstan.

Kenaikan *secant modulus* akibat penambahan serbuk kayu yang semakin banyak, menunjukkan hasil berupa garis linier. Hal ini berarti kenaikan kekuatan fleksuralnya terjadi secara proporsional. Data ini mendukung pernyataan bahwa semakin banyak serbuk kayu, maka fasa kristalinitasnya semakin meningkat. Dimana, kenaikan derajat kristalinitas ini sebanding dengan fraksi berat serbuk kayu yang ditambahkan, berupa hubungan yang proporsional. Akibat meningkatnya jumlah fasa kristalin, maka sifat WPC semakin kaku. Sehingga semakin banyak energi yang dibutuhkan agar WPC terdeformasi. Kekuatan ikatan di *interface* juga menjadi faktor penyebab peningkatan modulus fleksural tersebut. Semakin

banyak serbuk kayu yang ditambahkan ke dalam matriks, maka semakin luas daerah *interface*-nya, sehingga ikatan yang terbentuk semakin banyak dan stabilitas termalnya akan semakin baik.

Kecenderungan yang sama juga terlihat pada nilai modulus fleksural. Sifat WPC yang semakin kaku menjadikan modulus fleksural WPC semakin meningkat. Berikut adalah perbandingan hasil modulus fleksural WPC tiap-tiap formulasi:



Gambar 5. 12 Grafik pengaruh persentase serbuk kayu terhadap modulus flexural

Modulus fleksural dan 1% secant modulus sama-sama menggambarkan kekakuan WPC. Perbedaannya, modulus fleksural adalah beban maksimum yang mampu diterima oleh spesimen sebelum material WPC tersebut mengalami deformasi plastis, sedangkan secant modulus merupakan beban maksimum yang mampu diterima oleh spesimen sampai mengalami pembengkokan atau deformasi sebanyak 1% dari ketebalan spesimen. Oleh sebab itu nilai keduanya hampir sama besar. Namun, yang sering dipakai oleh Industri untuk menggambarkan kekuatan adalah secant modulus.

Ketahanan Impak

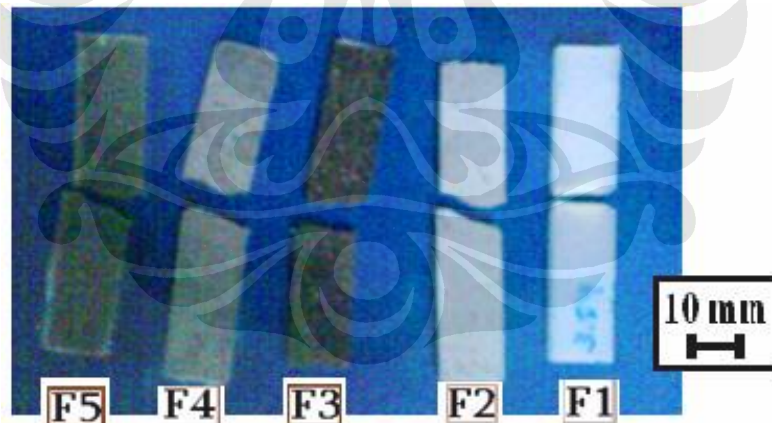
Berbeda dengan sifat mekanik lainnya, penambahan serbuk kayu justru berdampak negatif terhadap ketahanan impak. Semakin banyak penambahan serbuk kayu ke dalam WPC, menyebabkan energi yang diserap oleh material WPC saat dikenai beban kejut atau beban impak semakin sedikit sehingga WPC

semakin mudah patah. Berikut adalah grafik hasil pengujian impact yang menggambarkan hubungan antara fraksi berat serbuk kayu dalam WPC dan energi yang sanggup diserap material tersebut sampai terjadinya perpatahan:



Gambar 5. 13 Grafik pengaruh persentase serbuk kayu terhadap ketahanan impact

Pada grafik di atas terlihat adanya penyimpangan data pada sampel dengan 20% wt serbuk kayu. Hal ini berkaitan dengan kecurigaan akan adanya kontaminasi. Hal ini akan dibahas pada sub-bab selanjutnya.



Gambar 5. 14 Spesimen uji impact yang telah terdeformasi dan patah

Akibat dari penurunan energi absorb ini menyebabkan ketahanan impact WPC semakin menurun. Fenomena ini disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya derajat kristalinitas. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa serbuk kayu dapat berfungsi sebagai *nucleating agent*. Serbuk kayu akan merangsang terbentuknya inti kristalisasi sehingga derajat kristalinitasnya semakin tinggi.^[44] Hal ini berarti bahwa fasa kristalin yang

terbentuk akan semakin banyak dibandingkan fasa amorf. Akibatnya material WPC menjadi semakin getas. Ketika dikenai pembebanan impak, WPC menjadi lebih mudah *failure*.

Sebenarnya, penambahan serbuk kayu dapat meningkatkan ketangguhan PP. Tapi hal ini tergantung dari arah orientasi serat kayu. Serat kayu yang terorientasi sejajar dengan arah pembebanan justru menurunkan ketangguhan akibat adanya efek takik dalam, khususnya serat dengan posisi sejajar atau mendekati sejajar dengan arah pembebanan.^[50] Efek “takik dalam” ini menyebabkan seolah-olah di dalam komposit terbentuk takik-takik akibat bentuk geometri pada bagian ujung serat yang menyerupai takik dan menjadi pusat konsentrasi ketika diberi pembebanan. Hal ini berakibat pada semakin turunnya kekuatan impak, karena semakin banyak kayu yang digunakan menyebabkan semakin banyaknya stress konsentrasi yang terbentuk.

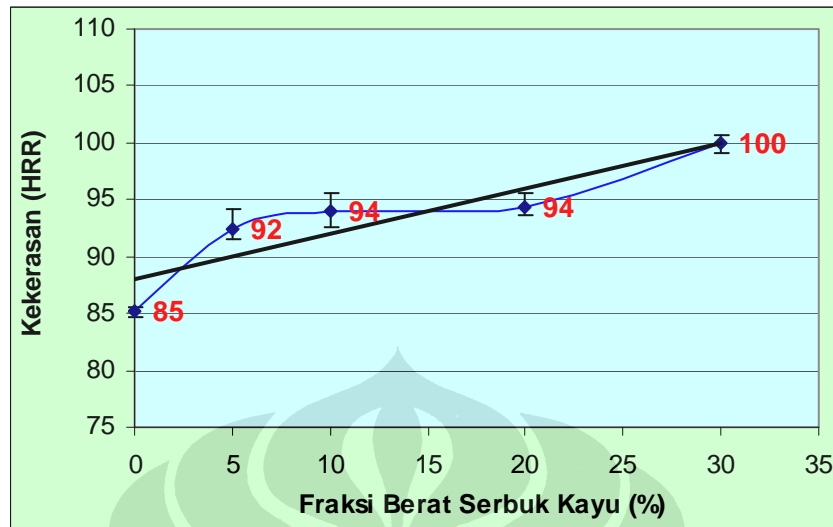
Walaupun serat dengan posisi tegak lurus arah takik akan menghambat penjalaran retak, namun serat dengan posisi ini juga memiliki ujung runcing yang merupakan pusat stress konsentrasi. Pada saat dikenai beban kejut (pembebanan secara tiba-tiba), pengaruh stress konsentrasi ini lebih dominan dibandingkan dengan orientasi tegak lurus serat kayu yang menghambat penjalaran retak. Oleh sebab itu, ketahanan impaknya semakin menurun.

Kekerasan

Dampak yang serupa juga mempengaruhi nilai kekerasan. Semakin banyaknya fasa kristalin yang terbentuk akibat semakin tingginya fraksi volume serbuk kayu dalam WPC, menyebabkan WPC menjadi semakin *brittle* dan semakin kaku. Semakin kaku suatu material maka kekuatannya akan semakin tinggi dan semakin sulit untuk terdeformasi. Hal inilah yang meningkatkan nilai kekerasan WPC. Berikut adalah grafik nilai kekerasan WPC:

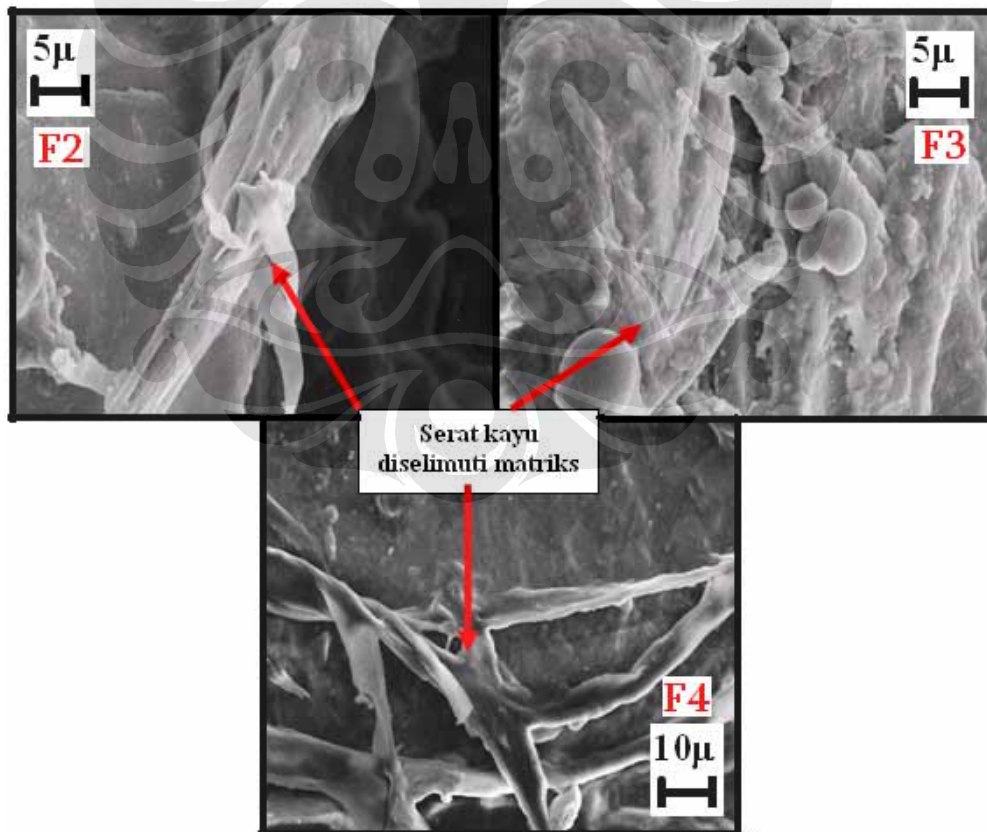
Bentuk serat yang seperti jarum juga menjadi faktor penambahan kekerasan. Ketika WPC diindetasi, akumulasi tegangan pembebanan akan terpusat pada daerah yang runcing tersebut. Akibatnya, nilai kekerasan di daerah tersebut akan tinggi karena dibutuhkan energi lebih banyak untuk mendeformasinya. Semakin

banyak fraksi berat serbuk kayu yang ditambahkan, berarti semakin banyak stress konsentrasi yang terbentuk, sehingga material WPC tersebut semakin keras.



Gambar 5. 15 Grafik pengaruh persentase serbuk kayu terhadap kekerasan

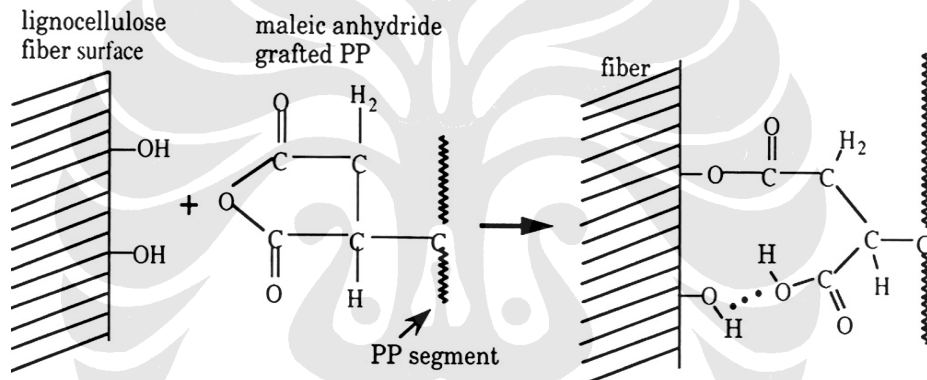
5.4 Analisa Permukaan Patahan dan Kekuatan Ikatan.



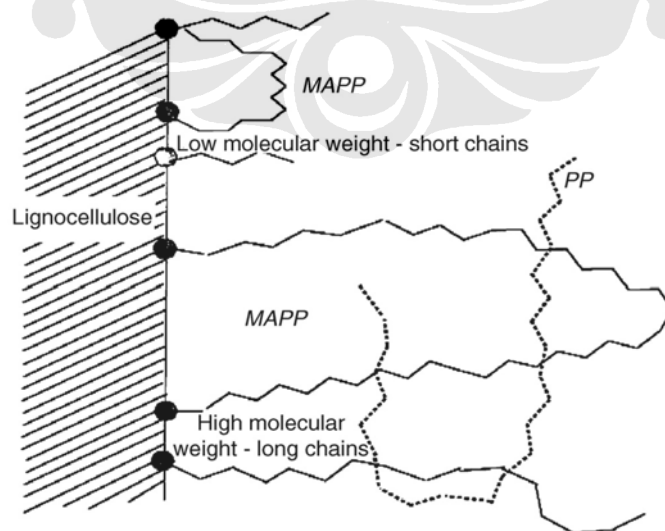
Gambar 5. 16 Pembasahan matriks terhadap serbuk kayu di permukaan WPC hasil analisis SEM

Hasil pengujian mekanik menunjukkan dampak yang cukup positif dari penambahan serbuk kayu ke dalam matriks PP. Semakin banyak persentase serbuk kayu yang ditambahkan ke dalam WPC, mengakibatkan peningkatan sifat mekanik yang cukup signifikan. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa ikatan antara matriks dengan pengisi, terjadi dengan cukup kuat. Hal ini sejalan dengan hasil pengamatan mikro dengan SEM menggunakan detektor *secondary electron* (SE) pada daerah permukaan spesimen yang tidak mengalami pembebanan. Berikut adalah *image* hasil SE:

Dari ketiga gambar di atas, terlihat bahwa matriks PP dapat melakukan pembasahan dengan sangat baik terhadap serat serbuk kayu. Hal ini berarti *coupling agent* PPMA sudah bekerja dengan cukup baik karena dapat menyatukan dua substituen yang sangat jauh berbeda polaritasnya.

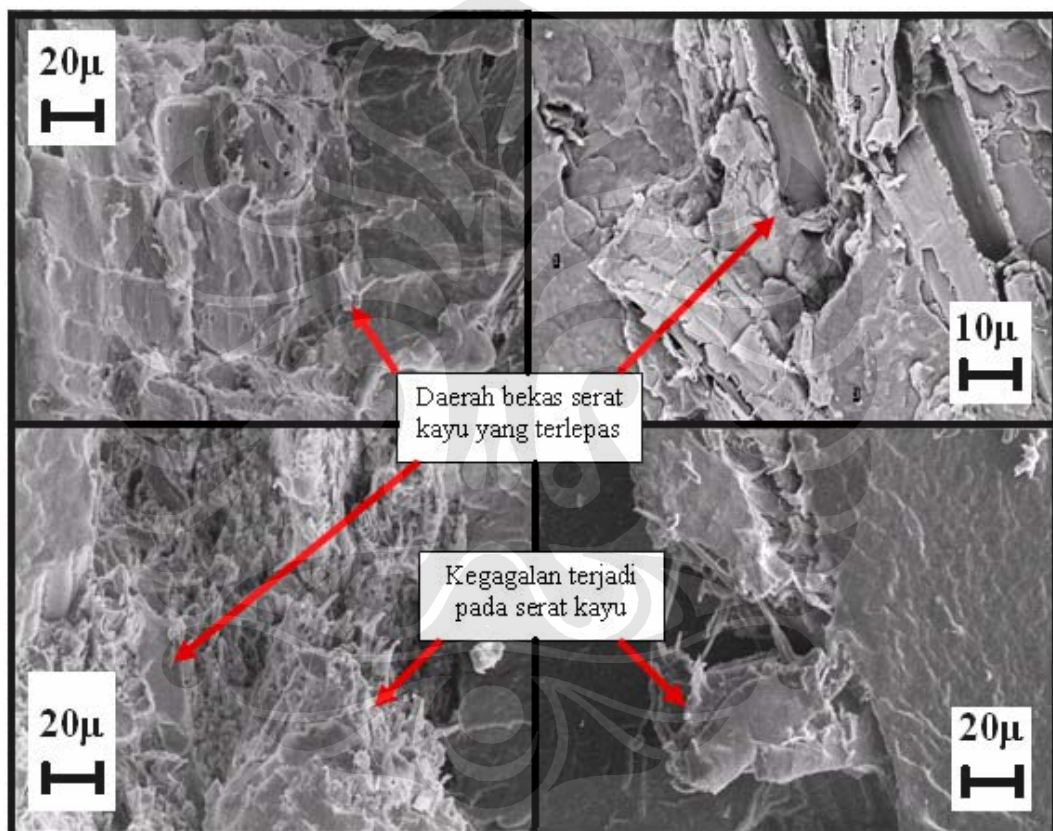


Gambar 5. 17 Reaksi antara gugus anhidrida pada PPMA dengan gugus hidroksil pada permukaan kayu. [28]



Gambar 5. 18 Matriks PP menjerat PP pada PPMA sehingga terbentuk ikatan interlocking [28]

Maleat Anhidrat pada PPMA akan berikatan secara kovalen dengan gugus hidroksil pada serbuk kayu membentuk *ester linkage*. Dan juga sekaligus berikatan hidrogen dengan gugus hidroksil lainnya pada lignin dan selulosa. Ditambah lagi, bagian PP pada PPMA akan dijerat oleh matriks PP sehingga terjadi ikatan mekanik (*interlocking*),^[28] dimana mekanismenya diilustrasikan oleh gambar 5.17 dan 5.18. Dengan demikian terbentuk ikatan yang sangat kuat antara matriks PP dengan serbuk kayu. Pembasahan yang seperti terlihat pada gambar di atas, menunjukkan ikatan yang terjadi antara matriks dengan pengisi yang cukup tinggi, sehingga kekuatan mekaniknya cenderung meningkat.



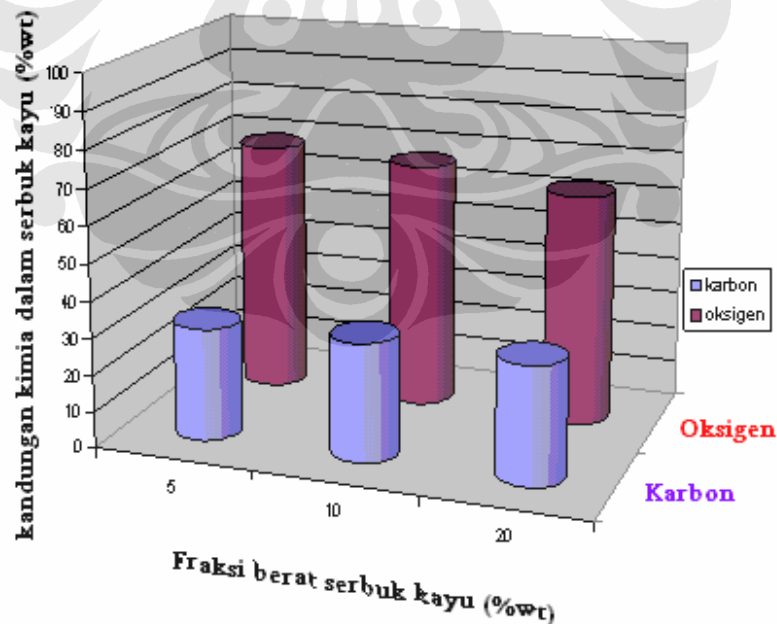
Gambar 5. 19 Permukaan Patahan Impak WPC hasil analisis menggunakan SEM

Pada daerah *interface*, terdapat dua mode perpatahan akibat pembebanan impact, seperti terlihat pada gambar. Pertama, kegagalan interface, yaitu kegagalan yang terjadi karena ikatan antara serat kayu dengan matriks tidak lebih kuat dibandingkan ikatan internal matriks dan ikatan internal serat kayu, sehingga ketika diberi beban impact, serat kayu tertarik keluar dari matriks. Ketika pembebanan impact mencapai nilai maksimumnya, serat yang terlepas dari matriks dan meninggalkan jejak cekungan.

Mode kedua, yaitu perpatahan yang terjadi pada serat kayu itu sendiri. Pergeseran retak yang melewati *interface* antara serat kayu dengan matriks PP, justru membuat serat kayu terputus. Hal ini disebabkan oleh ikatan pada *interface* lebih kuat dibandingkan ikatan internalnya, sehingga ketika energi pembebanan sudah dapat mendeformasi WPC, serat kayulah yang mengalami *failure*.

Kecepatan pembebanan mempengaruhi mode perpatahan suatu material. Semakin tinggi kecepatan pembebanan maka mode perpatahannya cenderung membentuk pola *brittle*.^[9] Sehingga pada daerah matriks, pembebanan kejut membuat mode perpatahannya cenderung rata. Tidak seperti spesimen uji tarik yang memiliki dimpel-dimpel akibat void yang terbentuk dari pergerakan perpatahan yang terjadi secara perlahan, pembebanan impact relatif cepat sehingga mekanisme penjalaran ratak terjadi dengan sangat cepat dan tidak membentuk struktur dimpel. Akibatnya permukaan patahan membentuk pola seperti hasil pembelahan (*cleavage*) yang tidak sepenuhnya rata sebagai hasil propagasi ratakan.

5.5 Analisis Kontaminan

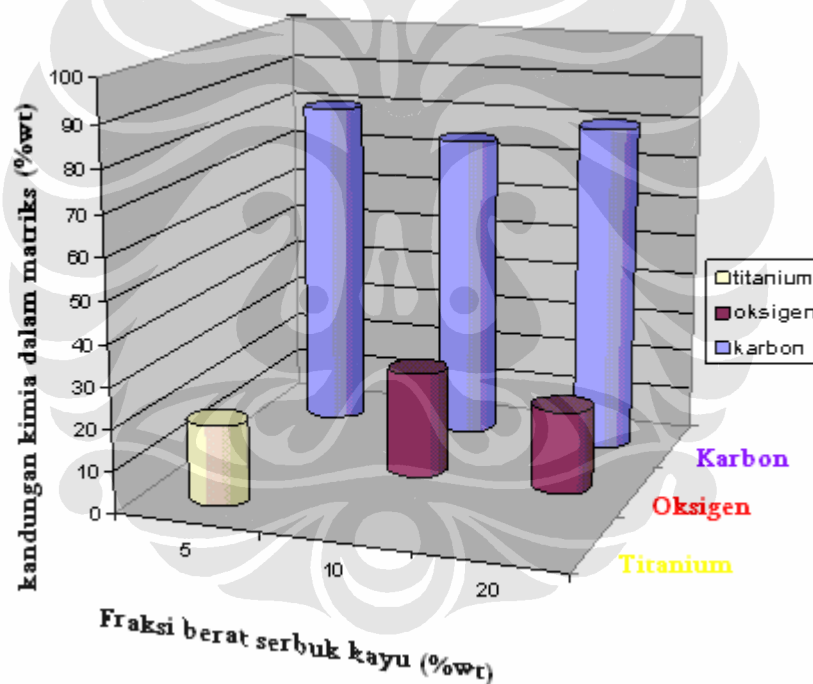


Gambar 5. 20 Grafik kandungan kimia pada serbuk kayu

Serbuk kayu dan PP merupakan jenis material hidrokarbon (polimer). Oleh karenanya, baik pada serbuk kayu maupun pada matriks, selalu terdeteksi unsur

karbon, walaupun dalam kadar yang berbeda. Unsur dominan yang terdapat pada serbuk kayu adalah karbon dan oksigen. Kedua unsur kimia ini merupakan kandungan utama yang menyusun serbuk kayu, yaitu selulosa, holoselulosa, hemiselulosa, dan lignin. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.7 sampai gambar 2.9. Dari ketiga gambar tersebut menunjukkan bahwa unsur karbon cenderung lebih banyak dibandingkan unsur karbon pada setiap senyawa kompleks penyusun serat kayu. Fakta ini sejalan dengan perbandingan persentase kandungan kimia di dalam serbuk kayu hasil EDX.

Sedangkan pada daerah matriks, unsur dominannya adalah karbon ($\pm 80\%$), dimana karbon merupakan unsur utama penyusun propilena di dalam PP maupun PPMA. Unsur oksigen pada daerah matriks yang terdeteksi oleh BSE detektor, merupakan oksigen yang berasal dari PPMA.



Gambar 5. 21 Grafik kandungan kimia pada matriks

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, formulasi dua dan formulasi empat mengalami perubahan warna. Fenomena ini diidentifikasi sebagai akibat adanya kontaminan. Hal ini terbukti dari pembacaan EDX bahwa sampel F2 terdeteksi unsur titanium. Titanium merupakan unsur sisa katalis Ziegler-natta, tapi persentasenya sangat kecil sehingga dapat diabaikan. Titanium disini kemungkinan besar adalah zat yang mengkontaminasi F2. Titanium ini berasal

dari TiO_2 yang terdapat pada *colorant* (pewarna). Hal ini mengingat bahwa WPC tersebut dipelletasi di laboratorium sebuah perusahaan *compounding masterbatch*, dimana salah satu produknya adalah *colorant*. Titanium dioksida inilah yang meningkatkan opasitas sehingga WPC sampel F2 tampak berwarna putih gading. TiO_2 selain berfungsi sebagai pigmen pewarna juga dapat meningkatkan kekuatan mekanik.^[51]

Untuk sampel F3 dan F4, hanya terdeteksi karbon dan oksigen. Berdasarkan pengaruhnya terhadap nilai impak yang justru meningkat, kontaminan pada F4 kemungkinan merupakan jenis *masterbatch impact modifier*. Dalam hal ini, *impact modifier* ini adalah jenis poliolefin, yaitu polietilena, dimana termasuk rantai hidrokarbon. Hal inilah yang menyebabkan EDX hanya mendeteksi unsur karbon dan oksigen pada daerah matriks sampel F4. Hal ini pula yang membuat kadar karbon pada sampel F4 relatif lebih banyak jika dibandingkan dengan sampel F3 yang tidak terkontaminasi.

Sayangnya, kontaminan-kontaminan tersebut tidak dapat terdeteksi dengan baik sebab EDX hanya dapat mendeteksi unsur, bukannya senyawa. Selain itu, senyawa dengan unsur penyusun yang sama, dideteksi sebagai unsur yang sama sehingga mempersilit analisis. Untuk menganalisis senyawa kimia seharusnya menggunakan XRD. Tapi, penguji tidak memiliki yang cukup waktu untuk melakukan hal tersebut.

Kelemahan lain EDX yang dipakai dalam penelitian ini adalah tidak dapat mendeteksi unsur dengan persentase dibawah 0.5% atau harus lebih besar dari 5000 ppm. Padahal beberapa kandungan aditif yang memiliki persentase sangat kecil cukup memberikan pengaruh terhadap perubahan karakteristik WPC. Tapi, unsur-unsur tersebut justru tidak terdeteksi.

Akan tetapi, analisis kimia dengan menggunakan EDX merupakan analisis unsur pada satu titik tertentu dengan luasan arean yang sangat kecil. Sehingga, data kuantitatif yang diperoleh tidak presentatif.