

## BAB IV

### HASIL PENELITIAN

#### IV.1 PENGAMATAN VISUAL

##### IV.1.1 Sampel Pellet

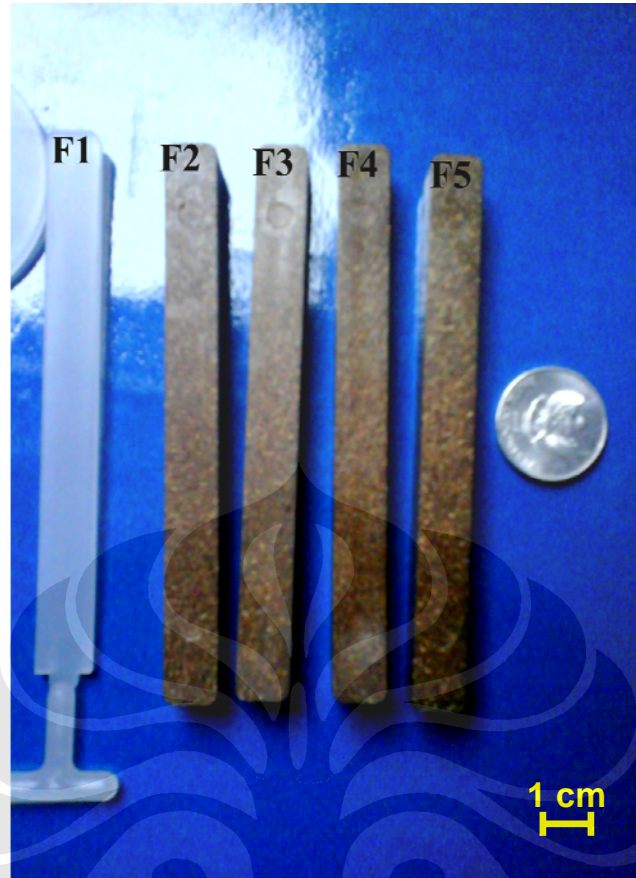
Sampel pellet PP (F1) berwarna antara putih dan transparan (translusen), sedangkan sampel WPPC (F2, F3, F4, dan F5) berwarna coklat kayu. Berikut ini gambar penampakan pellet hasil ekstrusi untuk kelima kode sampel.



**Gambar 4.1** Sampel pellet hasil ekstrusi kelima kode sampel.

##### IV.1.2 Sampel Hasil Pencetakan Injeksi

Warna pada sampel hasil pencetakan injeksi terlihat sama dengan sampel yang berupa pellet untuk seluruh kode sampel. Gambar 4.2 memperlihatkan sampel hasil pencetakan injeksi untuk pengujian fleksural.



**Gambar 4.2** Sampel hasil pencetakan injeksi, atas: sampel pengujian fleksural; bawah: sampel pengujian impak izod. Terlihat sampel mengalami penyusutan setelah pencetakan (*post-mold shrinkage*).

## IV.2 PENGUJIAN MFR

Pengujian MFR dilakukan dengan menggunakan sampel berupa pellet yang diukur laju alir lelehnya. MFR merupakan laju alir massa lelehan sampel dalam gram selama 10 menit. Berikut ini data hasil pengujian MFR.

**Tabel 4.1** Hasil pengujian MFR.

Kode sampel	F1	F2	F3	F4	F5
MFR (g/10min)	8.1	6.0	8.9	18.5	21.1

## IV.3 PENGUJIAN DSC

Dari pengujian DSC didapat nilai temperatur leleh ( $T_m$ ) dan temperatur kristalisasi ( $T_c$ ). Temperatur leleh yang diamati adalah temperatur leleh sebelum dihilangkannya sejarah termal ( $T_{m1}$ ) dan temperatur leleh setelah dihilangkannya sejarah termal ( $T_{m2}$ ). Dan  $T_c$  yang terdapat pada data adalah  $T_c$  setelah sejarah termal dihilangkan. Berikut ini disajikan data hasil pengujian DSC.

**Tabel 4.2** Hasil pengujian DSC.

Kode sampel	F1	F2	F3	F4	F5
$T_{m1}$ (°C)	160	160	161	160	160
$T_{m2}$ (°C)	156	157	159	159	158
$T_c$ (°C)	108	114	117	118	119

## IV.4 PENGUJIAN KUAT TARIK

Dari pengujian kuat tarik, didapatkan hasil berupa kuat tarik (*tensile strength*), elongasi, dan modulus elastisitas. Data tercatat secara komputerisasi. Tabel 4.3, 4.4, dan 4.5 berikut ini merupakan data hasil pengujian tarik.

**Tabel 4.3** Hasil pengujian tarik untuk data kuat tarik ( $\sigma$ ).

Kode sampel	F1	F2	F3	F4	F5
$\sigma$ rata-rata (MPa)	31.9	23.9	33.3	33	33.1
$\sigma$ max (MPa)	32.8	24.4	33.4	33.3	36.8
$\sigma$ min (MPa)	29.7	23.7	33.2	32.7	29.1
Std. dev. (MPa)	1.44	0.294	0.133	0.424	3.86
Std. error (%)	4.53	1.23	0.40	1.29	11.66

**Tabel 4.4** Hasil pengujian tarik untuk elongasi.

Kode sampel	F1	F2	F3	F4	F5
Elongasi rata-rata (%)	12	15.5	11	4.9	5.2
Elongasi max (%)	12	16	11	5.2	5.3
Elongasi min (%)	12	15	11	4.5	5
Std. dev. (%)	0	0.21	0.043	0.495	0.15
Std. error (%)	0	1.34	0.40	10.21	2.96

**Tabel 4.5** Hasil pengujian tarik untuk modulus elatisitas (E).

Kode sampel	F1	F2	F3	F4	F5
E rata- rata (MPa)	593	418	650	814	640
E max (MPa)	604	449	670	890	695
E min (MPa)	574	405	629	739	559
Std. dev. (MPa)	13.2	21.1	22.40	107	71.5
Std. error (%)	2.23	5.05	3.45	13.09	11.17

#### IV.5 PENGUJIAN FLEKSURAL

Dari pengujian fleksural didapat hasil modulus fleksural yang merupakan parameter ketahanan material terhadap kondisi penekukan. Penekukan dilakukan sampai sampel berdeformasi sebesar 1% dari ketebalannya. Sama seperti pengujian tarik, data yang diambil adalah yang tercatat secara komputerisasi. Berikut ini data hasil pengujian fleksural.

**Tabel 4.6** Hasil pengujian fleksural.

Kode sampel	F1	F2	F3	F4	F5
E <sub>H</sub> rata-rata (MPa)	1130	857	1490	1460	1510
E <sub>H</sub> max (MPa)	1180	868	1510	1510	1510
E <sub>H</sub> min (MPa)	1100	839	1470	1410	1510
Std. dev. (MPa)	43.8	15.8	18.90	66.7	(N/A)
Std. error (%)	3.88	1.85	1.27	4.57	(N/A)

#### IV.6 PENGUJIAN IMPAK IZOD

Dari pengujian impak izod, didapat nilai *notched izod impact resilience* yang merupakan energi impak yang diserap oleh sampel setiap satuan ketebalan sampel dalam satuan Joule/meter. Sama seperti pada pengujian tarik dan fleksural, data yang diambil merupakan data yang tercatat secara komputerisasi. Berikut ini data hasil pengujian impak izod.

**Tabel 4.7** Hasil pengujian impak izod.

Kode sampel	F1	F2	F3	F4	F5
<i>Izod Impact Resilience</i> rata-rata (J/m)	6.66	4.47	4.54	4.74	6.01
<i>Izod Impact Resilience</i> max (J/m)	7.52	4.94	5.79	5.16	7.09
<i>Izod Impact Resilience</i> min (J/m)	6.22	4.1	3.27	3.68	4.73
Std. dev. (J/m)	0.54	0.36	1.26	0.71	1.04
Std. error (%)	8.17	8.06	27.80	14.97	17.24

#### IV.7 PENGUJIAN KEKERASAN

Pada pengujian kekerasan, diambil 8 titik pada beberapa sampel hasil pencetakan injeksi untuk setiap kode sampelnya. Penjejukan dilakukan dengan alat penguji kekerasan Rockwell R otomatis. Berikut ini data hasil pengujian kekerasan.

**Tabel 4.8** Hasil pengujian kekerasan.

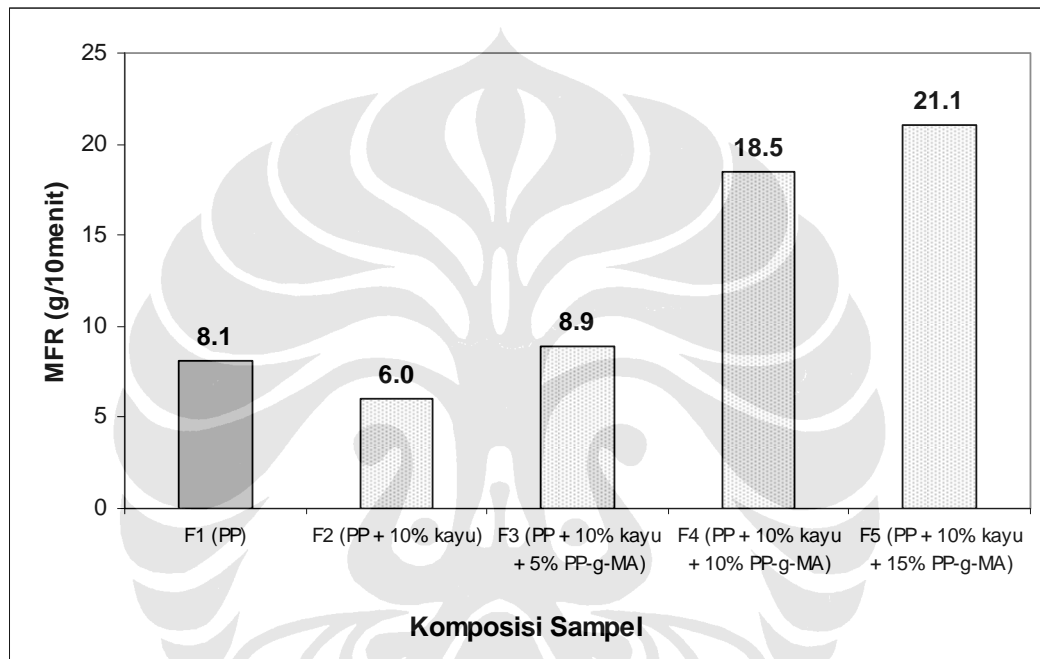
Kode sampel	F1	F2	F3	F4	F5
HRR rata-rata	86	90	95	94	98
HRR max	87	91	97	100	100
HRR min	84	87	92	91	96
Std. dev. (HRR)	1.06	3.04	1.82	3.36	1.61
Std. error (%)	1.24	3.38	1.90	3.56	1.64

## BAB V

### PEMBAHASAN

#### V.1 PENGARUH PENAMBAHAN PP-g-MA TERHADAP LAJU ALIR LELEH (MFR)

Berikut ini merupakan grafik nilai MFR dari seluruh sampel.



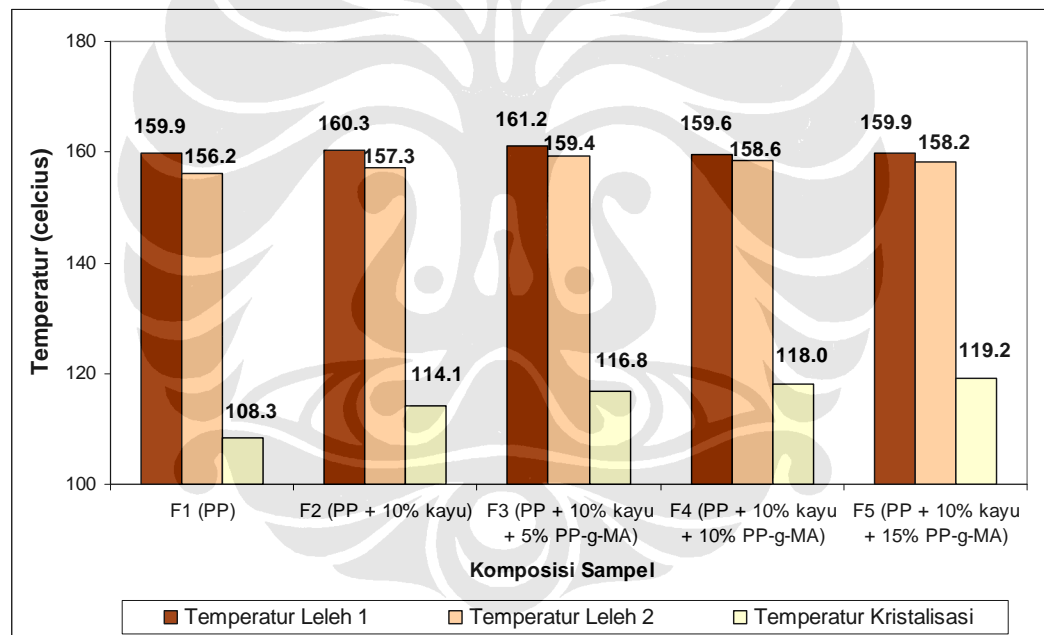
**Gambar 5.1** Grafik hubungan komposisi sampel terhadap MFR.

Pada pengujian MFR, diperoleh hasil yang menunjukkan bahwa sampel WPPC tanpa penambahan PP-g-MA memiliki MFR 6.01 g/10 menit, lebih rendah daripada MFR PP, yaitu 8.1 g/10 menit. Pada WPPC yang ditambahkan PP-g-MA, terlihat pada setiap penambah kadar PP-g-MA menyebabkan kenaikan MFR. Nilai MFR selalu berkebalikan dengan nilai kekentalan, ini berarti WPPC tanpa PP-g-MA memiliki kekentalan lebih tinggi daripada PP dan WPPC yang ditambahkan PP-g-MA memiliki kekentalan lebih rendah daripada PP. Penambahan serbuk kayu pada PP menyebabkan penurunan MFR karena partikel-partikel serbuk kayu tidak dapat meleleh ataupun melarut, sehingga pergerakan aliran PP yang telah leleh menjadi terhambat.

Untuk sampel WPPC yang telah ditambahkan PP-g-MA, MFR meningkat seiring dengan pertambahan PP-g-MA karena PP-g-MA yang digunakan memiliki kekentalan leleh rendah, jauh lebih rendah daripada kekentalan resin PP yang digunakan, maka penambahan PP-g-MA tersebut tentunya menyebabkan penurunan kekentalan leleh pada sistem WPPC secara keseluruhan.

## V.2 PENGARUH PENAMBAHAN PP-g-MA TERHADAP TEMPERATUR LELEH DAN TEMPERATUR KRISTALISASI

Dari pengujian DSC diperoleh grafik yang menunjukkan nilai temperatur leleh sebelum dilakukan pra-pemanasan ( $T_{m1}$ ), temperatur leleh setelah pra-pemanasan ( $T_{m2}$ ), dan temperatur kristalisasi ( $T_c$ ) di bawah ini.



**Gambar 5.2** Grafik hubungan komposisi sampel terhadap  $T_{m1}$ ,  $T_{m2}$ , dan  $T_c$ .

Terlihat bahwa pada seluruh sampel yang dibuat memiliki temperatur leleh yang hampir sama, baik  $T_{m1}$  maupun  $T_{m2}$ . Sedangkan,  $T_c$  terlihat mengalami kenaikan.  $T_c$  pada sampel WPPC lebih tinggi daripada  $T_c$  PP. Selain itu,  $T_c$  juga semakin tinggi seiring dengan pertambahan kadar PP-g-MA.

Temperatur leleh yang hampir sama pada setiap sampel secara keseluruhan menunjukkan bahwa keberadaan serbuk kayu dan PP-g-MA tidak terlihat mempengaruhi temperatur leleh matriks PP.

Sedangkan gejala naiknya  $T_c$  disebabkan keberadaan serbuk kayu di dalam matriks PP. N. Sombatsompop, *et al.* [42] menjelaskan bahwa serbuk kayu dalam PP bersifat sebagai zat nukleasi yang menyebabkan kristalisasi bisa terjadi pada temperatur yang lebih tinggi, namun membatasi kristalisasi saat pertumbuhan kristal. Mereka melakukan studi DSC dan difraksi sinar-X (X-ray diffraction, XRD) pada PP dengan penambahan serbuk gergajian. Hasil yang mereka peroleh dari DSC menunjukkan PP yang ditambahkan serbuk gergajian memiliki  $T_c$  yang lebih tinggi daripada  $T_c$  PP, namun semakin banyak kadar serbuk gergajian dalam matriks PP menjadikan jangkauan  $T_c$  semakin kecil. Dari pengujian XRD, mereka memperoleh hasil semakin banyak kadar serbuk gergajian menyebabkan penurunan derajat kristalinitas yang cukup signifikan.

Penelitian lain yang dilakukan oleh D. Harper dan M. Wolcott [43] juga menjelaskan bahwa adanya serat selulosa dalam PP leleh memberikan permukaan untuk terjadinya nukleasi kristal lebih cepat daripada pada polimer *bulk*. Dengan adanya permukaan tambahan yang menjadi tempat terjadinya nukleasi, maka nukleasi akan lebih mudah terjadi pada saat pendinginan. Oleh karena nukleasi adalah eksotermis dan butuh pendinginan untuk terjadi, maka kenaikan temperatur kristalisasi mengindikasikan peningkatan nukleasi.

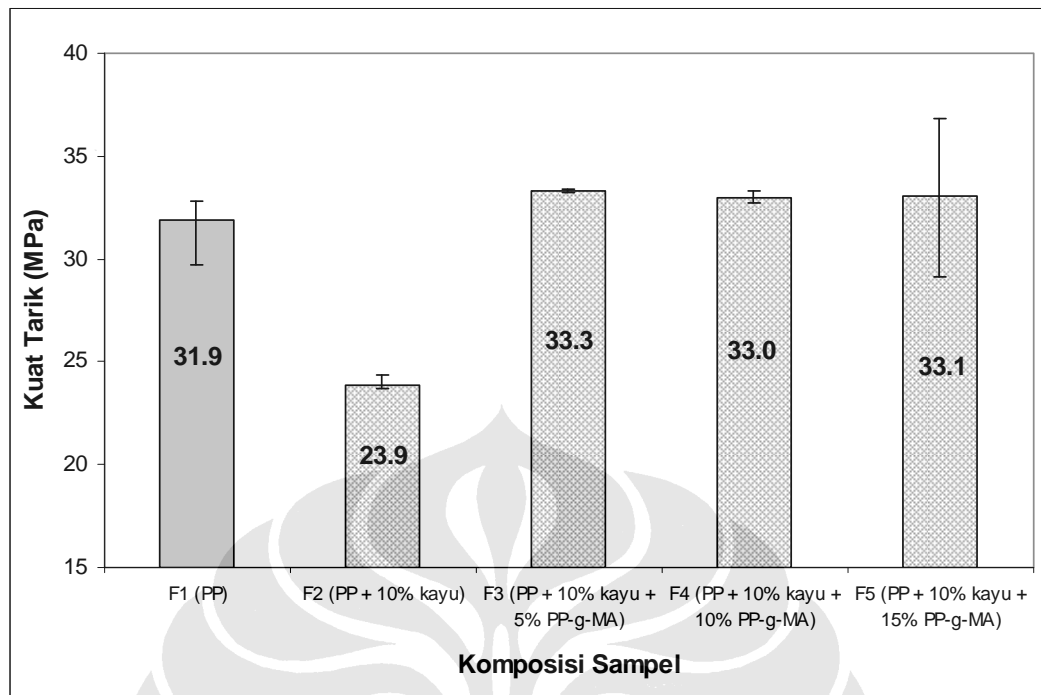
Sedangkan pengaruh penambahan PP-g-MA yang menyebabkan naiknya  $T_c$  juga dijelaskan oleh D. Harper dan M. Wolcott [43], di mana penambahan poliolefin termaleasi menyebabkan nukleasi meningkat, baik antara permukaan kayu dan pada matriks polimer. Pada penelitian lain, Yin *et al.* [44] menemukan bahwa penambahan PP-g-MA pada PP berpengisi serat kayu meningkatkan kapasitas nukleasi, menghasilkan struktur antarfasa yang terdiri dari bagian transkristalin menyelimuti setiap serat kayu, dan dilaporkan bahwa PP-g-MA mengkristal lebih cepat dengan adanya serbuk kayu.

### **V.3 PENGARUH PENAMBAHAN PP-g-MA TERHADAP KUAT TARIK, ELONGASI, DAN MODULUS ELASTISITAS**

#### **V.3.1 Pengaruh Penambahan PP-g-MA Terhadap Kuat Tarik**

Berikut disajikan grafik yang menggambarkan kuat tarik pada seluruh komposisi sampel dari hasil pengujian.





**Gambar 5.3** Grafik hubungan komposisi sampel terhadap kuat tarik.

Hasil pengujian tarik diperoleh nilai kuat tarik WPPC tanpa PP-g-MA sebesar 23.9 MPa lebih rendah daripada kuat tarik PP, yaitu 31.9 MPa. Hal ini disebabkan ikatan antarmuka yang tidak baik, sehingga keberadaan pengisi serbuk kayu tidak bersifat menguatkan, melainkan melemahkan.

Penambahan PP-g-MA pada WPPC meningkatkan kekuatan. Ini menunjukkan bahwa adanya PP-g-MA baik digunakan sebagai zat penggabung karena dapat memperbaiki adhesi pada daerah antarmuka pengisi serbuk kayu dan matriks PP, sehingga ikatan antarmuka menjadi lebih kuat dan fungsi pengisi serbuk kayu karet yang diharapkan bisa menjadi penguat dapat terpenuhi. Ikatan antarmuka yang terjadi disebabkan oleh pembentukan ikatan ester antara cincin MA pada PP-g-MA dengan lignoselulosa yang terdapat dalam serbuk kayu [26].

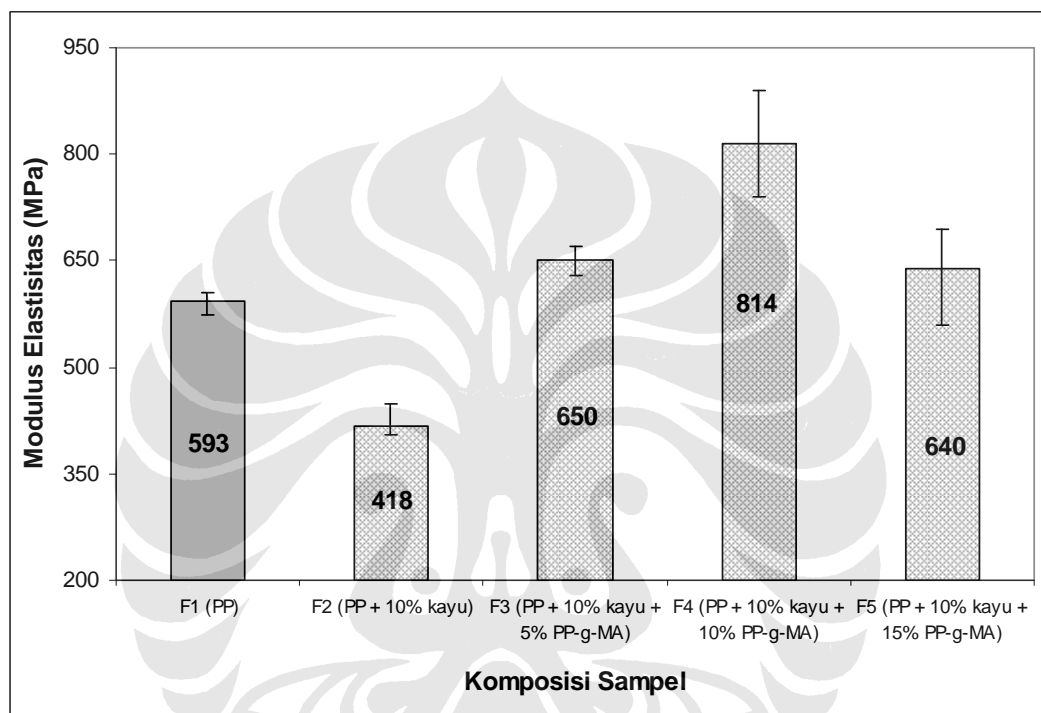
WPPC dengan penambahan kadar PP-g-MA pada 5%, 10%, dan 15% berat memiliki kuat tarik rata-rata yang hampir sama, yaitu 33.3 MPa; 33.0 MPa; dan 33.1 MPa.

Dari grafik di atas (Gambar 5.3) terlihat bahwa WPPC yang ditambahkan PP-g-MA hanya memiliki kekuatan yang sedikit lebih tinggi daripada kekuatan

PP, sehingga dapat dikatakan bahwa penambahan PP-g-MA di sini tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kuat tarik.

### V.3.2 Pengaruh Penambahan PP-g-MA Terhadap Modulus Elastisitas

Berikut ini grafik yang tergambar dari hasil pengujian yang menunjukkan nilai modulus elastisitas pada seluruh sampel.



Gambar 5.4 Grafik hubungan komposisi sampel terhadap modulus elastisitas.

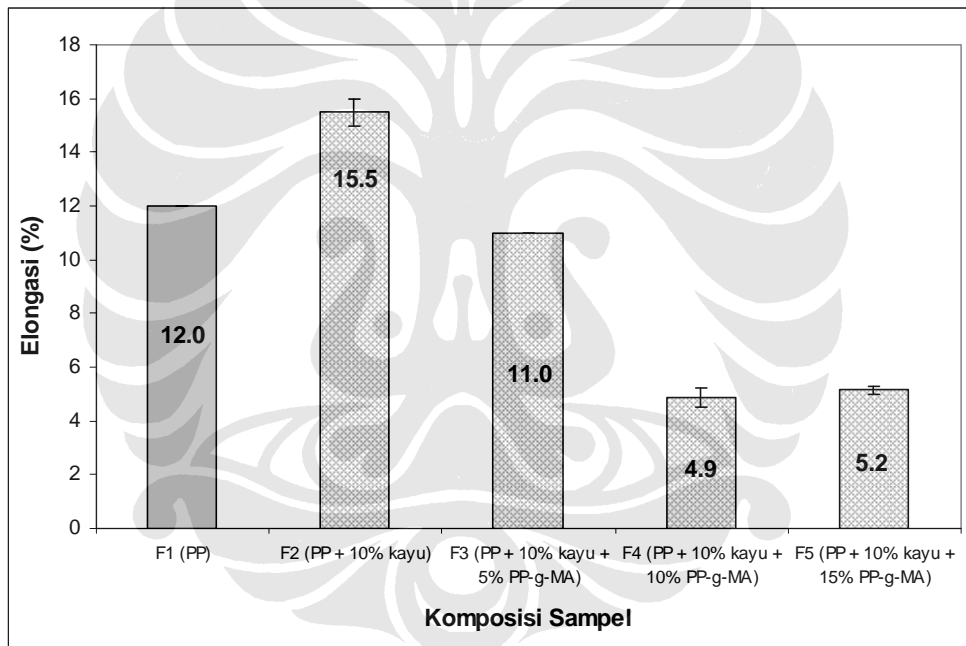
Terlihat bahwa WPPC tanpa penambahan PP-g-MA mengalami kehilangan kekakuan karena ikatan antarmuka yang tidak baik. Sampel WPPC tanpa penambahan PP-g-MA memiliki modulus elastisitas 418 MPa, lebih rendah daripada sampel PP, yaitu 593 MPa.

Penambahan PP-g-MA sebanyak 5% dan 10% berat menyebabkan modulus elastisitas meningkat menjadi 650 MPa dan 814 MPa, sedangkan penambahan PP-g-MA sebanyak 15% berat menyebabkan penurunan kembali menjadi 640 MPa. Sama seperti penjelasan sebelumnya, bahwa penambahan PP-g-MA dapat memperkuat ikatan antarmuka antara matriks PP dan pengisi serbuk kayu. Ikatan antarmuka antara matriks PP dan pengisi serbuk kayu yang kuat menjadikan

pergerakan molekul PP pada saat penarikan terbatas oleh ikatan tersebut. Sedangkan penambahan PP-g-MA sebanyak 15% berat menyebabkan WPPC mengalami pengurangan kekakuan karena PP-g-MA yang digunakan pada penelitian ini mempunyai wujud wax yang sangat lunak pada saat padat, sehingga menjadikan modulus elastisitas menurun.

### V.3.3 Pengaruh Penambahan PP-g-MA Terhadap Elongasi

Data hasil pengujian tarik memperlihatkan adanya perbedaan elongasi pada setiap sampel dengan komposisi yang berbeda. Berikut grafik yang tergambar dari hasil.



**Gambar 5.5** Grafik hubungan komposisi sampel terhadap elongasi.

Dari data hasil pengujian tersebut terlihat seperti adanya penyimpangan pada nilai elongasi untuk WPPC tanpa penambahan PP-g-MA. Di mana sampel WPPC tanpa PP-g-MA memiliki nilai elongasi lebih tinggi daripada sampel PP dan seluruh sampel WPPC yang ditambahkan PP-g-MA. Terlihat juga dari hasil pengujian bahwa penambahan kadar PP-g-MA cenderung menjadikan elongasi menurun, sehingga data hasil pengujian seolah-olah menunjukkan penambahan PP-g-MA menyebabkan kegetasan pada WPPC.

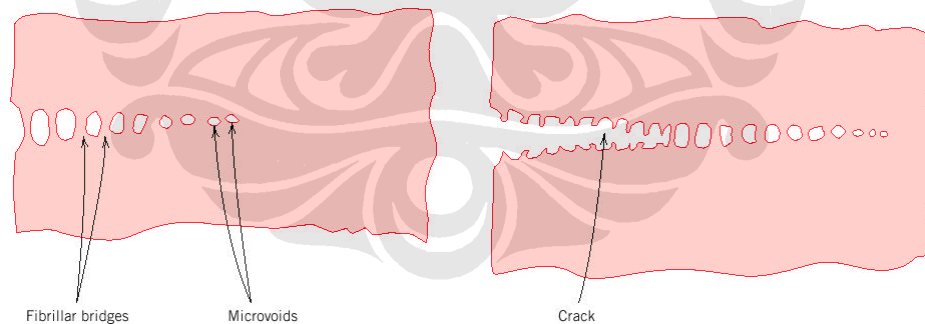
Penyimpangan pada nilai elongasi pada WPPC tanpa PP-g-MA terjadi karena adhesi yang kurang baik antara matriks PP dan pengisi serbuk kayu. Adhesi yang kurang baik menjadikan matriks PP tidak membasahi permukaan pengisi serbuk kayu dengan sempurna, sehingga memungkinkan terdapat celah-celah mikro pada antarmuka. Adanya celah-celah mikro pada antarmuka menjadikan material kehilangan kekakuannya karena mudah terdeformasi, yang mana terlihat dari nilai modulus elastisitas. Pada umumnya elongasi berkebalikan dengan modulus elastisitas, semakin rendah modulus elastisitas maka semakin tinggi elongasi. Sebagaimana hukum Hooke yang biasanya ditulis dengan rumus sebagai berikut:

$$\sigma = E \varepsilon \quad (5.1)$$

Sehingga besar elongasi yang terjadi adalah

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (5.2)$$

Menurut literatur [14], kegagalan pada polimer terjadi melalui tahapan *crazing*, di mana pada tahap ini terjadi penghubungan celah-celah mikro. Sebelum peretakan terjadi, proses pertumbuhan *craze* menyerap energi patahan dan secara efektif meningkatkan ketangguhan patah (*fracture toughness*) polimer.

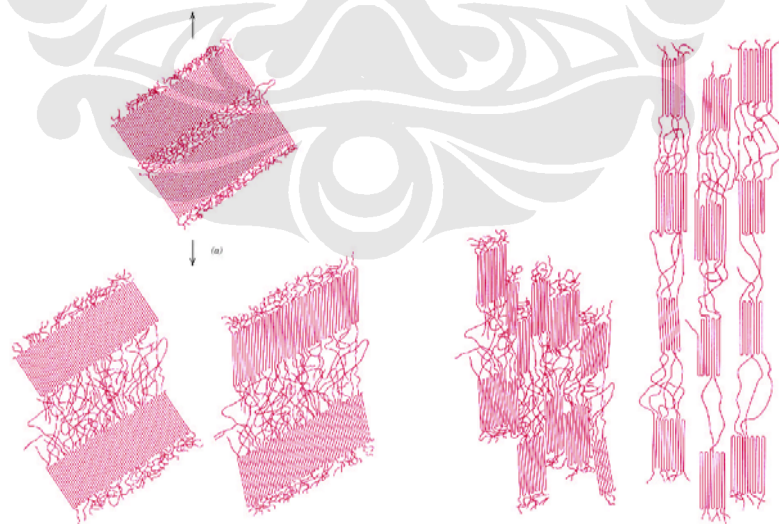


**Gambar 5.6** Gambaran skematik dari sebuah *craze* (a) menunjukkan celah-celah mikro dan jembatan fibrilar dan (b) diikuti dengan retak [14].

Sedangkan, hasil di mana penambahan kadar PP-g-MA cenderung menjadikan elongasi menurun dapat dijelaskan dengan penjelasan bagaimana PP-g-MA dapat menjadi penghubung antara matriks PP dan pengisi serbuk kayu. PP-g-MA menjadikan adhesi antara matriks PP dan pengisi serbuk kayu semakin kuat dengan membentuk ikatan ester antara cincin MA dengan lignoselulosa pada serbuk kayu [26], sehingga penambahan PP-g-MA menjadikan ikatan antarmuka

antara matriks PP dan pengisi serbuk kayu semakin kuat dan pergerakan molekul PP saat terjadi penarikan sangat terbatas oleh ikatan tersebut.

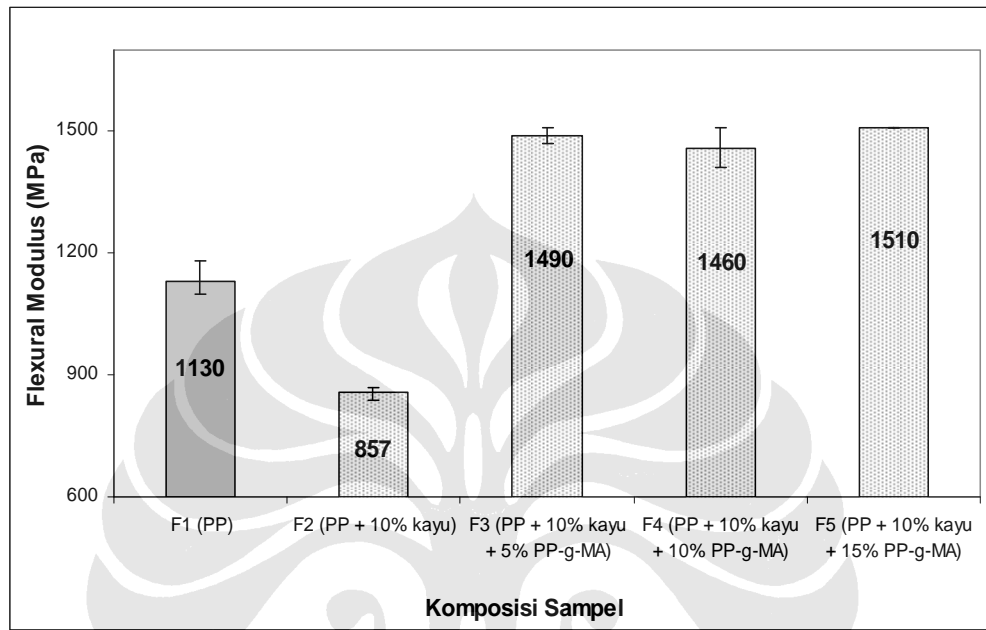
Kemungkinan lain yang menyebabkan penambahan kadar PP-g-MA cenderung menjadikan elongasi menurun adalah karena meningkatnya kapasitas nukleasi dan terjadinya transkristalisasi. Seperti yang sudah dijelaskan pada sub-bab V.2 dari penelitian Yin *et al.* [44], yang mana diketahui bahwa penambahan PP-g-MA pada PP berpengisi serat kayu meningkatkan kapasitas nukleasi dan menghasilkan struktur antarfasa yang terdiri dari bagian transkristalin menyelimuti setiap serat kayu. Bertambahnya kapasitas nukleasi memungkinkan berkurangnya ukuran *spherulite*, sehingga meningkatkan kerapatan antar *spherulite*. Seperti dijelaskan pada sub-bab II.3.3 bahwa *spherulite* terdiri dari tumpukan lamella [14], maka semakin tinggi kerapatan *spherulite* menyebabkan semakin rapat pula tumpukan lamella. Tumpukan lamella yang lebih rapat, akan mengurangi pergerakan bagian amorf dari polimer, yang mana pemuluran pada polimer semikristalin diawali dari bagian amorf [14]. Selain itu adanya struktur transkristalin yang menyelimuti serbuk kayu menyebabkan kegetasan pada antarmuka, sebab bagian kristalin merupakan bagian yang kaku, kuat, namun getas [14].



**Gambar 5.7** Tahap-tahap deformasi pada polimer: elongasi pada perikatan rantai amorf, pemiringan kristalit lamellar ke arah sumbu penarikan, pemisahan bagian-bagian blok kristalin, dan pelonggaran bagian-bagian kristalit dan amorfus sepanjang sumbu penarikan [14].

#### V.4 PENGARUH PENAMBAHAN PP-g-MA TERHADAP MODULUS FLEKSURAL

Data hasil pengujian fleksural untuk seluruh sampel digambarkan dalam bentuk grafik di bawah ini.



Gambar 5.8 Grafik hubungan komposisi sampel terhadap modulus fleksural.

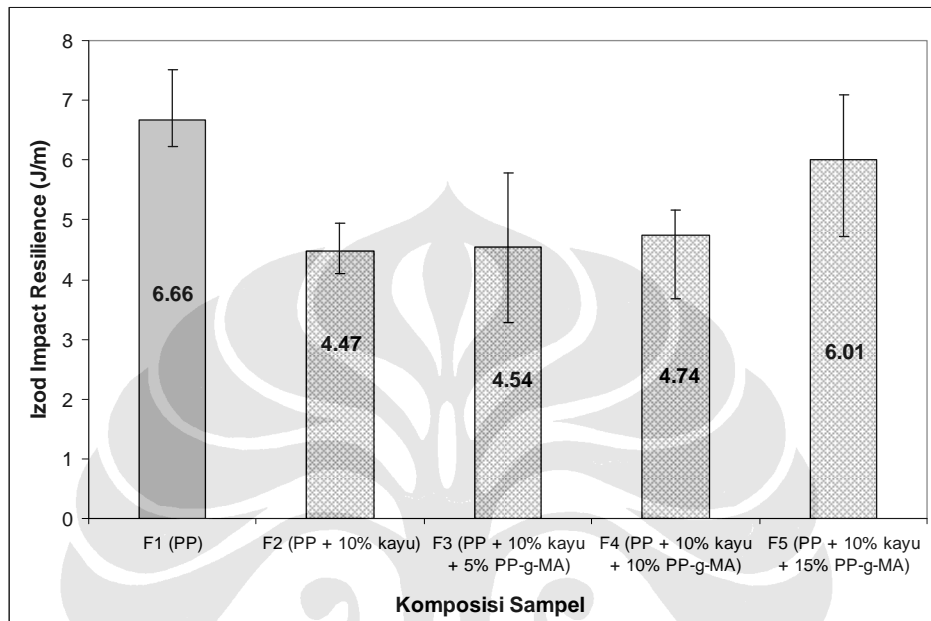
Dari grafik di atas (Gambar 5.8), terlihat bahwa WPPC tanpa penambahan PP-g-MA memiliki modulus fleksural 857 MPa, lebih rendah daripada PP, yaitu 1130 MPa. Dengan penambahan zat penggabung PP-g-MA sebanyak 5%; 10%; dan 15% berat menyebabkan modulus fleksural rata-rata bertambah menjadi 1490 MPa; 1460 MPa; dan 1510 MPa.

Seperti dibahas pada sub-bab V.4, bahwa WPPC tanpa penambahan PP-g-MA telah mengalami kehilangan kekakuan karena adhesi yang kurang baik menyebabkan adanya celah-celah mikro pada antarmuka sehingga mudah terdeformasi dengan beban yang lebih rendah, akibatnya nilai modulus fleksural menjadi menurun.

Peningkatan modulus fleksural dengan adanya penambahan PP-g-MA pada WPPC disebabkan PP-g-MA meningkatkan kekuatan ikatan antarmuka. Dengan terbentuknya antarmuka yang kuat, maka adanya serbuk kayu dapat membatasi pergerakan molekul PP saat diberi beban, sehingga kekakuan meningkat.

## V.5 PENGARUH PENAMBAHAN PP-g-MA TERHADAP KETAHANAN IMPAK IZOD

Berikut ini grafik yang menggambarkan hasil pengujian impak izod.



**Gambar 5.9** Grafik hubungan komposisi sampel terhadap ketahanan impak izod.

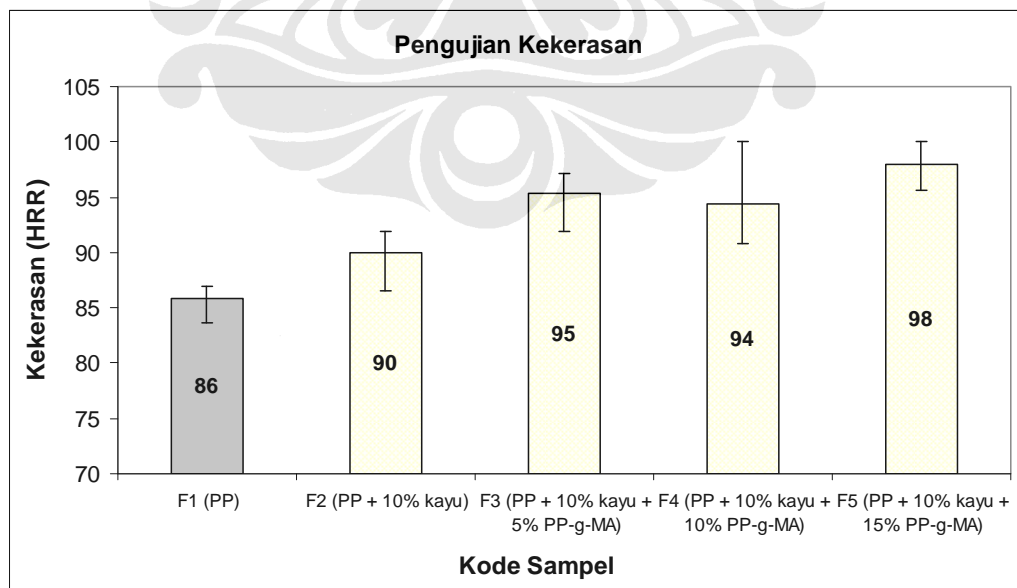
Terlihat dari grafik di atas (Gambar 5.9), seluruh sampel WPPC baik yang tidak ditambahkan maupun yang ditambahkan PP-g-MA memiliki nilai ketahanan impak izod lebih rendah daripada PP. Ketahanan impak izod rata-rata WPPC tanpa penambahan PP-g-MA bernilai 4.47 J/m, paling rendah di antara seluruh sampel yang lain. Ketahanan impak rata-rata WPPC tanpa penambahan PP-g-MA paling rendah di antara seluruh sampel yang lain disebabkan oleh adanya celah-celah mikro pada antarmuka karena adhesi yang tidak baik antara matriks PP dan pengisi. Celah-celah mikro menjadi konsentrasi tegangan saat diberi beban, sehingga ketahanan terhadap beban kejut berkurang. Pengujian impak berbeda mode pembebanannya dengan pengujian tarik. Pada pengujian impak, pembebanan yang diberikan pada sampel sangat cepat, jauh lebih cepat daripada pembebanan pada pengujian tarik [14], sehingga celah-celah mikro tidak bisa menjadi penyerap energi, melainkan menjadi konsentrasi tegangan.

Sampel WPPC dengan penambahan PP-g-MA sebanyak 5%, 10%, dan 15% berat memiliki nilai ketahanan impak izod rata-rata 4.54 J/m; 4.74 J/m; dan 6.01 J/m, lebih tinggi daripada WPPC tanpa penambahan PP-g-MA, yaitu 4.47 J/m. Ini menunjukkan bahwa penambahan PP-g-MA pada sistem WPPC ini tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap ketahanan impak.

Sedangkan penambahan PP-g-MA sebanyak 15% berat pada WPPC terlihat berpengaruh cukup signifikan, sehingga diperoleh nilai ketahanan impak izod rata-rata 6.01 J/m. Hal ini disebabkan fraksi berat PP-g-MA lebih besar daripada fraksi berat serbuk kayu yang digunakan, di mana serbuk kayu yang digunakan adalah 10% berat, maka dapat dipastikan hampir seluruh permukaan serbuk kayu terselimuti oleh matriks, permukaan serbuk kayu yang hampir seluruh bagiannya diselubungi matriks terlihat pada pengamatan SEM pada permukaan patahan (akan dibahas lebih lanjut pada sub-bab V.8), di mana matriks PP menjerat segmen PP pada molekul PP-g-MA dan cincin MA pada PP-g-MA membentuk ikatan ester dengan lingnoselulosa pada serbuk kayu (Gambar 2.20 dan 2.21).

## V.6 PENGARUH PENAMBAHAN PP-g-MA TERHADAP KEKERASAN

Dari pengujian kekerasan untuk seluruh sampel diperoleh hasil pengujian digambarkan dalam bentuk grafik yang tergambar dibawah ini.



Gambar 5.10 Grafik hubungan komposisi sampel terhadap kekerasan.



Seluruh sampel WPPC baik yang tidak ditambahkan PP-g-MA maupun yang ditambahkan PP-g-MA memiliki kekerasan yang lebih tinggi daripada kekerasan PP. Kekerasan juga cenderung meningkat seiring dengan penambahan kadar PP-g-MA.

Telah dijelaskan sebelumnya, bahwa keberadaan serbuk kayu dalam matriks PP bersifat sebagai zat penukleasi [42]. Karena matriks PP pada sampel WPPC bisa membentuk kristal pada temperatur yang lebih tinggi, maka pada temperatur ruang kerapatan *spherulite* pada matriks PP pada WPPC akan lebih banyak daripada PP tanpa serbuk kayu. Oleh karena itu, WPPC tanpa PP-g-MA memiliki kekerasan yang lebih tinggi daripada kekerasan PP.

WPPC dengan penambahan PP-g-MA 5%; 10%; dan 15% berat memiliki kekerasan rata-rata 95.36 HRR; 94.42 HRR; dan 98.04 HRR, lebih tinggi daripada WPPC tanpa PP-g-MA, yaitu 89.96 HRR karena adanya PP-g-MA yang menyebabkan nukleasi meningkat. Penjelasan ini sama seperti penjelasan pada sub-bab V.2, bahwa penambahan PP-g-MA pada PP berpengisi serat kayu meningkatkan kapasitas nukleasi [44]. Bertambahnya kapasitas nukleasi memungkinkan berkurangnya ukuran *spherulite*, sehingga kerapatan antar *spherulite* meningkat. Juga telah dijelaskan pada sub-bab V.3.2 bahwa dengan meningkatnya kerapatan *spherulite* maka kerapatan lamella juga meningkat dan menyebabkan lebih sulitnya bagian amorf untuk bergerak, sehingga kekerasan akan semakin tinggi. Sebagaimana dikatakan pada literatur [14], bahwa deformasi pada polimer semikristalin diawali pada bagian amorf.

Bagian sampel yang paling banyak terkristalisasi akan menjadi bagian paling keras, dalam hal ini adalah permukaan sampel. Seluruh sampel yang hasil pencetakan injeksi telah mengalami *post-mold shrinkage* (Gambar 4.2), sehingga permukaan sampel menjadi lebih keras karena bertambahnya kristalinitas. Pengujian kekerasan tentunya dilakukan pada permukaan sampel yang bersentuhan langsung dengan permukaan cetakan, sehingga walaupun PP-g-MA yang digunakan berwujud wax dalam keadaan padat, penambahannya tidak terlihat menurunkan nilai kekerasan.

## V.7 TINJAUAN ULANG PENGARUH PP-g-MA PADA KESELURUHAN KARAKTERISTIK WPPC

Dari keseluruhan parameter yang diujikan, maka diperoleh data yang merupakan tinjauan dari keseluruhan parameter pengujian. Berikut ini merupakan tinjauan ulang dari data hasil pengujian untuk keseluruhan parameter pengujian yang digambarkan dalam bentuk tabel.

**Tabel 5.1** Tinjauan ulang dari keseluruhan parameter uji.

Karakteristik	F1	F2	F3	F4	F5
Temperatur leleh I (°C)	159.9	160.3	161.2	159.6	159.9
Temperatur leleh II (°C)	156.2	157.3	159.4	158.6	158.2
Temperatur kristalisasi (°C)	108.3	114.1	116.8	118.0	119.2
Laju alir leleh, MFR (g/10menit)	8.1	6.0	8.9	18.5	21.1
Kuat Tarik (MPa)	31.9	23.9	33.3	33.0	33.1
Elongasi (%)	12.0	15.5	11.0	4.9	5.2
Modulus Elastisitas (MPa)	593	418	650	814	640
Modulus Fleksural (MPa)	1130	857	1490	1460	1510
Ketahanan Impak Izod (J/m)	6.66	4.47	4.54	4.74	6.01
Kekerasan (HRR)	86	90	95	94	98

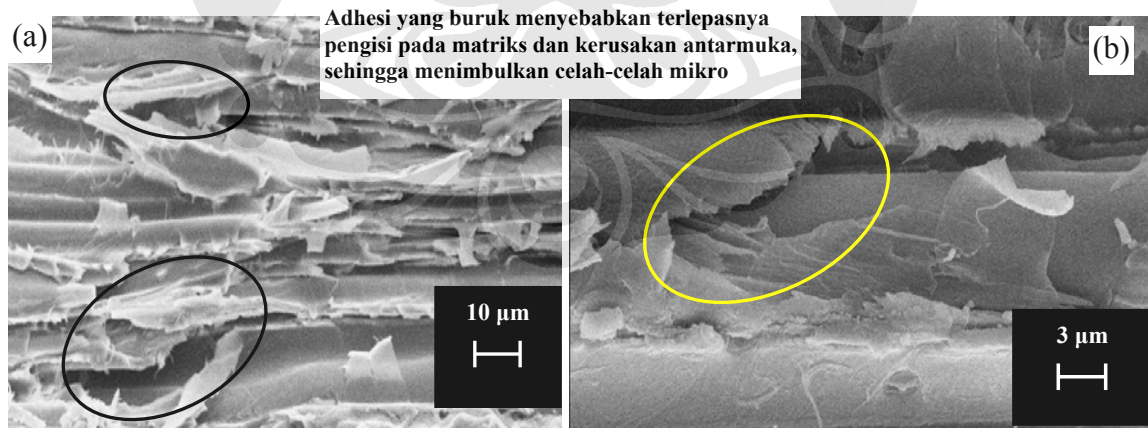
Dari tabel di atas, terlihat perubahan karakteristik akibat penambahan 10% berat serbuk kayu karet maupun penambahan PP-g-MA. Temperatur leleh, baik  $T_{m1}$  maupun  $T_{m2}$ , cenderung tidak mengalami perubahan yang berarti.  $T_c$  terlihat mengalami kenaikan signifikan akibat penambahan 10% berat serbuk kayu pada PP dan  $T_c$  juga mengalami kenaikan yang cukup berarti untuk WPPC pada setiap penambahan PP-g-MA. MFR mengalami penurunan akibat penambahan 10% berat serbuk kayu pada PP dan meningkat sangat signifikan dengan penambahan PP-g-MA. Kuat tarik mengalami penurunan untuk WPPC tanpa PP-g-MA dan kuat tarik untuk WPPC yang ditambahkan PP-g-MA cenderung meningkat disbanding WPPC tanpa PP-g-MA, namun penambahan PP-g-MA tidak terlihat mempengaruhi kuat tarik dengan signifikan jika dibandingkan dengan kuat tarik PP. Elongasi WPPC tanpa PP-g-MA terlihat mengalami kenaikan dibandingkan dengan elongasi PP dan penambahan PP-g-MA pada WPPC menyebabkan penurunan elongasi yang sangat signifikan. Modulus elastisitas pada WPPC tanpa PP-g-MA terlihat menurun dan penambahan PP-g-MA pada WPPC memberikan pengaruh kenaikan modulus elastisitas yang signifikan sampai dengan penambahan sebanyak 10% berat PP-g-MA dan modulus elastisitas menurun

kembali pada penambahan 15% berat PP-g-MA. Modulus fleksural pada WPPC tanpa PP-g-MA terlihat menurun dan modulus fleksural meningkat signifikan pada WPPC dengan PP-g-MA sampai dengan penambahan sebanyak 5% berat PP-g-MA dan penambahan PP-g-MA lebih dari 5% berat tidak terlihat memberikan pengaruh yang berarti pada modulus fleksural. Kekerasan meningkat signifikan dengan penambahan 10% berat serbuk kayu pada PP dan penambahan PP-g-MA pada WPPC juga cenderung memberikan kenaikan yang berarti pada nilai kekerasan. Dari Tabel 5.1 dan pembahasan di atas, maka penulis menyimpulkan bahwa penambahan PP-g-MA yang optimum untuk sistem WPPC ini adalah sebanyak 5% berat.

## V.8 PENGAMATAN SEM PADA PERMUKAAN PATAHAN SAMPEL

Dari hasil seluruh pengujian mekanik, terlihat penambahan PP-g-MA pada sistem WPPC mempengaruhi beberapa sifat mekanik secara signifikan dan beberapa sifat tidak terlihat mengalami perubahan yang berarti. Untuk membuktikan hasil pengujian mekanik, maka dilakukan pengamatan SEM pada permukaan patahan impact dengan menggunakan detektor SE.

Berikut ini gambar permukaan patahan sampel WPPC tanpa PP-g-MA.

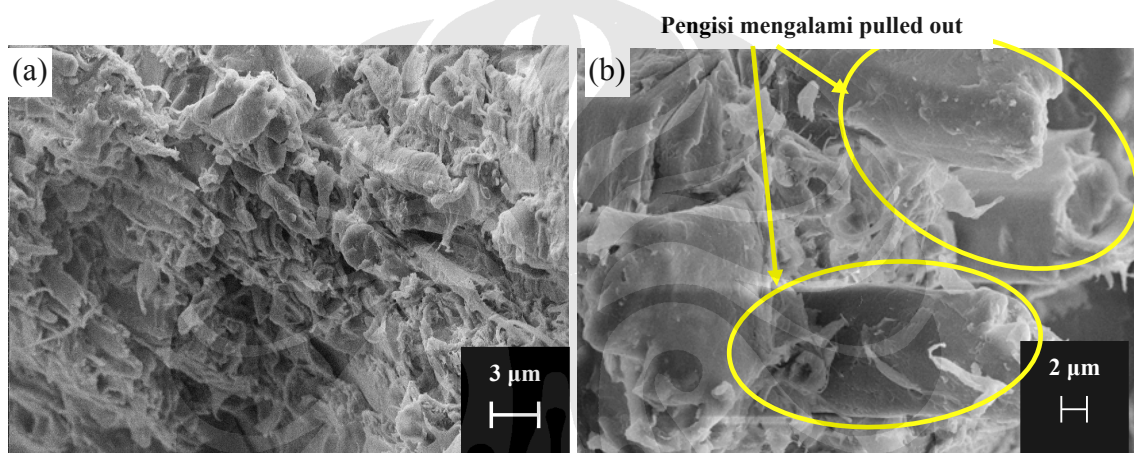


**Gambar 5.11** Permukaan patahan impact sampel WPPC Tanpa PP-g-MA.

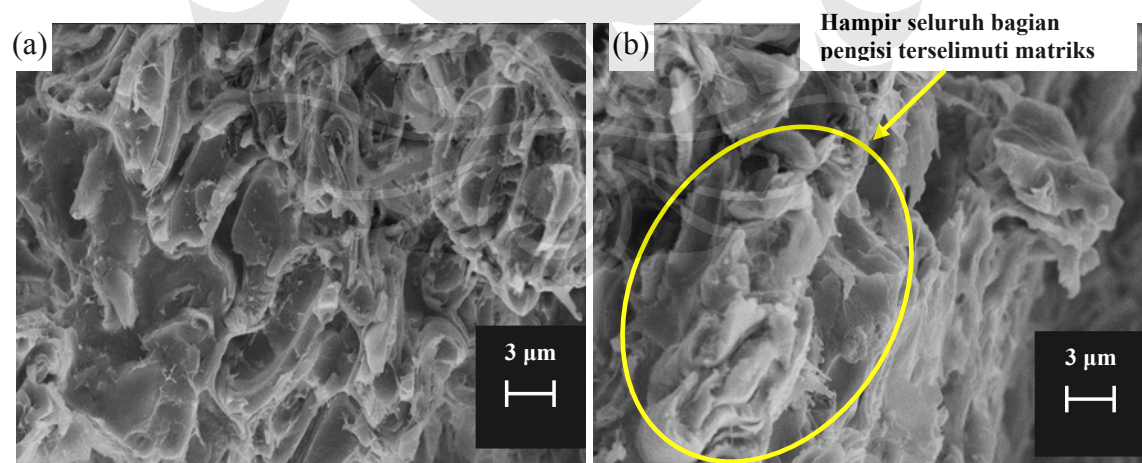
Gambar 5.11 Terlihat adhesi pada yang buruk pada antarmuka pengisi serbuk kayu dan matriks PP menyebabkan tidak terselimutinya pengisi oleh matriks PP, sehingga menimbulkan pelepasan (*debonding*) pada antarmuka dan celah-celah mikro. Adanya *debonding* dan celah-celah mikro tersebut menjadi

kelemahan [41], sehingga mempengaruhi hasil pengujian mekanik (pengujian tarik, pengujian fleksural, dan pengujian izod impak), yang mana sampel WPPC tanpa PP-g-MA memiliki nilai kuat tarik, modulus elastisitas, modulus fleksural, dan ketahanan impak izod paling rendah di antara seluruh sampel. Rendahnya modulus elastisitas dan modulus fleksural membuktikan bahwa WPPC tanpa PP-g-MA mengalami penurunan kekakuan yang disebabkan oleh timbulnya celah-celah mikro terlihat pada permukaan patahan.

Berbeda pada permukaan patahan WPPC dengan penambahan PP-g-MA, di mana terlihat adhesi yang baik pada antarmuka.



**Gambar 5.12** Permukaan patahan impak sampel WPPC dengan 10% berat PP-g-MA.



**Gambar 5.13** Permukaan patahan impak sampel WPPC dengan 15% PP-g-MA.

Gambar 5.12a memperlihatkan permukaan patahan yang tidak rata. Ini menunjukkan bahwa patahan yang terjadi adalah patahan ulet. Saat beban kejut diberikan, material masih dapat berdeformasi, sehingga permukaan hasil patahan tersebut menjadi tidak rata.

Gambar 5.12b memperlihatkan adhesi yang sangat baik pada antarmuka pengisi serbuk kayu. Terlihat terjadi pembasahan yang sangat baik pada pengisi serbuk kayu oleh matriks PP. Dengan kuatnya ikatan antara pengisi serbuk kayu dan matriks PP, maka serbuk kayu dapat membatasi pergerakan molekul PP saat diberi beban. Hal ini mendukung data hasil pengujian mekanik, di mana WPPC yang ditambahkan PP-g-MA memiliki kuat tarik, modulus elastisitas, dan modulus fleksural yang lebih tinggi daripada WPPC tanpa penambahan PP-g-MA. Walaupun PP-g-MA menjadikan ikatan antarmuka yang baik karena membentuk ikatan ester [26], namun tetap terdapat pengisi yang mengalami *pulled out*. Kegagalan awal terjadi pada antarmuka, yaitu kegagalan yang terjadi karena ikatan antarmuka serbuk kayu dan matriks PP tidak lebih kuat dibandingkan ikatan internal matriks PP dan ikatan internal serbuk kayu, sehingga ketika diberi beban impact, serat kayu tertarik keluar (*pulled out*) dari matriks. Ketika dilakukan pembebanan kejut, pengisi serbuk kayu terlepas dari matriks yang mengalami kegagalan, dan tertarik dan terbawa pada bagian matriks pada sisi yang lain yang lebih kuat mengikat pengisi tersebut, seperti yang terlihat pada Gambar 5.12b.

Gambar 5.13a memperlihatkan permukaan patahan tidak rata dan deformasi yang terjadi juga terlihat lebih besar, dibandingkan dengan Gambar 5.12a. Selain itu, terlihat pada Gambar 5.13b hampir seluruh bagian pengisi serbuk kayu terselimuti oleh matriks PP. Kedua hal ini menjelaskan mengapa sampel WPPC dengan penambahan PP-g-MA sebanyak 15% berat memiliki nilai ketahanan impact izod lebih tinggi daripada WPPC dengan penambahan PP-g-MA sebanyak 10% berat.

Gambar 5.13b menunjukkan adhesi yang sangat kuat antara pengisi serbuk kayu dan matriks PP. Terlihat pada antarmuka pengisi serbuk kayu yang hampir dibasahi seluruhnya oleh matriks PP. Pada permukaan patahan untuk sampel WPPC dengan penambahan 15% berat PP-g-MA sangat sulit ditemukan adanya pengisi yang mengalami *pulled out*, bahkan sulit terlihat di mana saja pengisi serbuk kayu tersebar karena pengisi benar-benar tertutupi oleh matriks.