

## Peningkatan Sifat Mekanis Polipropilena/Karet Alam Siklik dengan Penambahan Polipropilena-g-Asam Metakrilat

I Putu Mahendra<sup>1</sup>, Basuki Wirjosentono<sup>1\*</sup>, Tamrin<sup>1</sup>, dan Hanafi Ismail<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Sekolah Pascasarjana Ilmu Kimia, Universitas Sumatera Utara*

*Jl. Bioteknologi No. 1, Kampus USU Padang Bulan, Medan, 20155*

<sup>2</sup>*School of Materials and Mineral Resources Engineering, Universiti Sains Malaysia*

*Seri Ampangan, 14300 Nibong Tebal, Pulau Pinang, Malaysia*

*Email: basuki@usu.ac.id*

*Diterima: 01-Nov-2017    Diperbaiki: 03-Mar-2018    Disetujui: 29-Mei-2018*

### ABSTRAK

**Peningkatan Sifat Mekanis Polipropilena/Karet Alam Siklik dengan Penambahan Polipropilena-g-Asam Metakrilat.** Sifat mekanis blend polipropilena/ karet alam siklik (PP/KAS) berhasil ditingkatkan dengan penambahan *adhesion promoter* polipropilena-g-asam metakrilat (PP-g-MAA). Tujuan penambahan *adhesion promoter* PP-g-MAA adalah untuk meningkatkan kompatibilitas blend PP/KAS yang ditentukan dari perubahan sifat mekanisnya. Material *adhesion promoter* PP-g-MAA yang didesain dengan *Quaitek V4.0* memiliki nilai derajat *grafting* (%G) 4-30%. Variasi nilai tersebut dipengaruhi oleh perbedaan parameter (temperatur, % divinil benzena, % asam metakrilat, dan waktu reaksi) yang digunakan dalam proses polimerisasi. Penggunaan PP-g-MAA dalam blend PP/KAS dapat meningkatkan sifat mekanis bahan (*Tensile strength*, *Young's Modulus* dan *Elongation at Break*). Tidak terdapat korelasi linear antara nilai %G dan sifat mekanis bahan yang disebabkan oleh perbedaan panjang rantai akrilat yang terbentuk selama proses polimerisasi tidak terkontrol. Namun demikian, penambahan *adhesion promoter* PP-g-MAA pada blend PP/KAS dapat meningkatkan kompatibilitas material yang dinyatakan dengan diperolehnya permukaan yang memiliki dispersi yang baik.

**Kata Kunci:** polipropilena, *adhesion promoter*, PP-g-MA, sifat mekanis, kompatibilitas

### ABSTRACT

***Mechanical Properties Enhancement of Polypropylene/Cyclized Natural Rubber Blend using Polypropylene-g-Methacrylic Acid.*** The mechanical properties of polypropylene/cyclized natural rubber (PP/CNR) blends has been enhanced using the *adhesion promoter* of polypropylene-g-methacrylic acid (PP-g-MAA). The aim

*of the addition of PP-g-MAA is to improve the compatibility of PP/CNR blends that was determined through the mechanical properties. The adhesion promoter of PP-g-MAA was prepared in the solvent system and the experimental design was set up using Qualitek V.4.0. The adhesion promoter has grafting degree (%G) of 4-30%. That value is influenced by the different parameters (temperature, % divinylbenzene, % methacrylic acid, and time of reaction) that were used during the polymerization process. The utilization of PP-g-MAA in the blend of PP/CNR can improve the mechanical properties of blends (Tensile strength, Young's Modulus and Elongation at Break). There is no correlation between %G and the mechanical properties that is caused by the difference on the length of acrylic homopolymer that formed during the uncontrolled polymerization. However, the addition of PP-g-MAA into the PP/CNR blend can improve compatibility between PP and CNR, and this result is shown as well dispersed surface.*

**Keywords:** polypropylene, adhesion promoter, PP-g-MA, mechanical properties, compatibility

## PENDAHULUAN

Pada tahun 2012, penggunaan bahan plastik di dalam bisnis otomotif mencapai 11-14% dari keseluruhan jenis material yang digunakan. Pemanfaatan plastik di Eropa untuk bisnis otomotif mengalami peningkatan pertumbuhan sebesar 8,5% per tahun, yakni 6,7 juta ton pada tahun 2011 menjadi 10,2 juta ton pada tahun 2016 [1]. Pemanfaatan material plastik yang cukup besar dalam bisnis otomotif ini disebabkan oleh efisiensi bahan bakar yang lebih baik bila dibandingkan dengan penggunaan material besi.

Penggunaan material plastik di dalam bisnis otomotif, khususnya penggunaan plastik sebagai bahan baku untuk kendaraan menimbulkan sebuah tantangan dalam formulasi bahan pengikat cat [2]. Material plastik yang paling banyak digunakan dalam industri otomotif adalah polipropilena (PP) mencapai 37% pada tahun 2013 dari keseluruhan material plastik dalam industri otomotif. PP merupakan material polimer yang bersifat non-polar dan memiliki energi permukaan yang rendah, sedangkan bahan pengikat cat pada umumnya memiliki energi permukaan yang tinggi [3,4]. Inilah kendala utama dalam pengembangan bahan pengikat cat untuk material PP.

Karet alam siklis (KAS) merupakan turunan karet alam yang diperoleh melalui proses siklisasi dengan katalis asam lewis. KAS memiliki keunggulan pada daya tahan terhadap bahan kimia dan air serta merupakan resin yang sangat baik untuk diaplikasikan pada lingkungan yang rentan terhadap korosi, seperti untuk bahan pelapis/pengikat (binder) cat kapal (PT. IKN). Hingga penelitian yang berkembang saat ini, material KAS belum pernah dimanfaatkan sebagai material cat untuk permukaan PP, serta sangat

sedikit material cat yang memiliki daya rekat yang baik pada substrat poliolefin. Sifat adhesi yang lemah tersebut dapat disebabkan oleh kompatibilitas yang kurang antara bahan cat dengan permukaan poliolefin. Ryntz [5] menyatakan kompatibilitas yang tidak bagus pada permukaan substrat poliolefin disebabkan oleh PP ataupun substrat poliolefin yang digunakan merupakan polimer semi kristalin yang memiliki energi permukaan yang rendah sehingga sangat sulit untuk dilakukan proses pelapisan cat.

Berbagai cara telah dilakukan untuk meningkatkan daya rekat material cat pada permukaan PP, diantaranya dengan *pre-treatment* secara kimia yang meliputi penggunaan asam kromat, asam sulfat, dan trikloroetilena serta *pre-treatment* secara fisika yang meliputi penggunaan radiasi, *flame treatment*, *plasma treatment*, *corona treatment*, dan sinar UV [3,4,6–9]. Namun, kedua proses tersebut tidak efektif dan efisien untuk diterapkan dalam industri. Metode lain yang berkembang adalah dengan memanfaatkan material *adhesion promoter* yang umumnya merupakan material kopolimer blok, seperti *chlorinated polypropylene*, poli(akrilat/siloksan), PP-g-AM, PP-g-Akrilat dan lainnya [9,10]. Penggunaan PP termodifikasi turunan akrilat mendominasi material *adhesion promoter* yang dipergunakan untuk kepentingan industri cat. Hal ini disebabkan oleh rantai samping akrilat dapat membentuk homopolimer sehingga diasumsikan bahwa rantai akrilat ini lebih mudah mengalami interaksi dan bertindak sebagai penghubung dua permukaan dengan polaritas yang berbeda.

Dalam penelitian ini, PP termodifikasi asam metakrilat (PP-g-MAA) dimanfaatkan sebagai *adhesion promoter* untuk meningkatkan kompatibilitas antara PP dan KAS yang ditentukan melalui uji sifat mekanis dan morfologi permukaan. Material PP termodifikasi dipreparasi dengan mengikuti prosedur Mazhar [11] yang telah dimodifikasi. Modifikasi metode dilakukan pada variasi temperatur, dimana dengan meningkatnya temperatur reaksi diharapkan dapat meningkatkan nilai derajat *grafting* akrilat pada PP yang akan berimbas pada kompatibilitas antara PP dan KAS.

## **METODE PERCOBAAN**

### *Bahan dan Alat*

Bahan-bahan yang digunakan meliputi PP diperoleh dari SCG Performance Chemicals, Co. LTD. Benzoin peroksida, asam metakrilat (MAA), xilena, natrium hidroksida, akuades dan metanol diperoleh dari Merck. Seluruh bahan yang digunakan dalam penelitian ini dipergunakan tanpa adanya proses pemurnian.

*Desain Eksperimen*

Desain eksperimental (Tabel 1) untuk preparasi PP-g-MAA dirancang menggunakan *Software Qualitek V.4* dengan parameter kondisi seperti yang ditampilkan pada Tabel 2.

**Tabel 1.** Desain eksperimental PP-g-MAA

Kode sampel	Temperatur (°C)	MAA (%)	DVB (%)	waktu (menit)
PPMAA-1	150	5	0	30
PPMAA-2	150	10	5	60
PPMAA-3	150	15	10	120
PPMAA-4	150	20	20	180
PPMAA-5	160	5	5	120
PPMAA-6	160	10	0	180
PPMAA-7	160	15	20	30
PPMAA-8	160	20	10	60
PPMAA-9	170	5	10	180
PPMAA-10	170	10	20	120
PPMAA-11	170	15	0	60
PPMAA-12	170	20	5	30
PPMAA-13	180	5	20	60
PPMAA-14	180	10	10	30
PPMAA-15	180	15	5	180
PPMAA-16	180	20	0	120

**Tabel 2.** Parameter kondisi untuk desain eksperimental PP-g-MAA

	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
Temperatur (°C)	150	160	170	180
Asam metakrilat (% b/v)	5	10	15	20
Divinilbenzena (% b/v)	0	5	10	20
Waktu (menit)	30	60	120	180

*Proses Pembuatan PP-g-MAA*

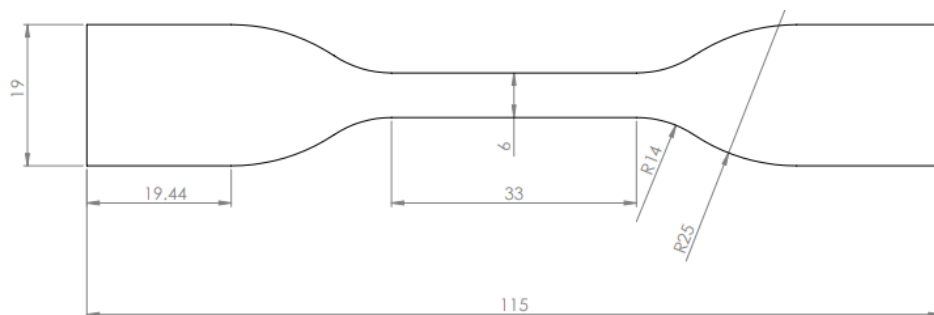
Sebanyak 20 g pelet PP dimasukkan ke dalam labu leher tiga yang telah diisi dengan 250 mL xilena. Setelah PP membentuk lelehan, sejumlah larutan inisiator benzoil peroksida ditambahkan. Setelah rentang waktu tertentu, monomer MAA ditambahkan ke dalam sistem dan diikuti dengan penambahan divinil benzena pada selang waktu berikutnya mengikuti formulasi pada Tabel 1. Produk PP-g-MAA dipisahkan dengan cara dituangkan ke dalam larutan NaOH (akuades/metanol) panas dan dicuci berulang dengan akuades hingga pH netral, lalu dikeringkan dalam oven hingga diperoleh berat konstan. Proses pemurnian dilanjutkan dengan sokletasi PP termodifikasi menggunakan pelarut metanol selama 24 jam.

### *Proses Pembuatan Blend PP/KAS/PP-g-MAA*

PP dengan berat tertentu dimasukkan ke dalam *internal mixer* Plastograph EC (Brabender), yang telah diset pada temperatur 170 °C dan kecepatan rotor 50 rpm, selama 7 menit. Pada saat nilai *torque* konstan, KAS dengan perbandingan massa yang sesuai terhadap PP (80:20) dimasukkan ke dalam *internal mixer* diikuti dengan penambahan PP-g-MAA (1 wt.%) hingga nilai *torque* konstan. Setelah proses *blending* selesai, material blend PP/KAS/PP-g-MAA dikeluarkan dari *internal mixer* pada saat kondisi panas dan disimpan dalam wadah plastik selama 24 jam pada suhu ruang.

### *Preparasi Dumbbell*

Spesimen *dumbbell* (ASTM D638-08) seperti Gambar 1, dipreparasi dengan proses cetak dalam alat *hydraulic hot press*. Material PP/KAS blend disusun diatas cetakan aluminium hingga tidak ada rongga. Selanjutnya, plat aluminium diletakkan pada alat *hydraulic hot press* dengan pengaturan sebagai berikut, temperatur 170 °C, tekanan 100 kN dan waktu 10 menit. Setelah temperatur *hydraulic hot press* dan plat mencapai suhu ruang, spesimen *dumbbell* dikeluarkan dari cetakan aluminium dan disimpan dalam wadah plastik.



**Gambar 1.** Spesimen *dumbbell* ASTM D638-08 tipe IV

### *Karakterisasi*

Derajat grafting *adhesion promoter* PP-g-MAA ditentukan dengan metode gravimetri [11]. Analisis gugus fungsi ditentukan menggunakan pellet KBR dengan FTIR spectrophotometer 8201PC Shimadzu pada bilangan gelombang 4000-500  $\text{cm}^{-1}$  dengan resolusi 2  $\text{cm}^{-1}$ . Sifat mekanis (*tensile strength*, *Young's modulus* and *elongation at break*) ditentukan menggunakan *Universal Testing Machine* TM1122 (Instron). Analisis morfologi permukaan pada struktur patahan PP/KAS/PP-g-MAA dianalisis dengan *Tabletop Microscope* TM4000.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Nilai derajat grafting (%G) MAA pada PP ditunjukkan pada Tabel 3 dan informasi kontribusi parameter terhadap %G yang diproses dengan software Qualitek V.4.0 ditunjukkan pada Tabel 4 dan Gambar 2-5. Beragam nilai %G yang diperoleh sangat dipengaruhi oleh parameter reaksi yang digunakan, diantaranya adalah temperatur, % DVB, %MAA dan waktu reaksi.

**Tabel 3.** Derajat grafting PP termodifikasi

Kode Sampel	% G
PPMAA-1	4,48
PPMAA-2	10,61
PPMAA-3	22,31
PPMAA-4	25,29
PPMAA-5	14,20
PPMAA-6	17,59
PPMAA-7	16,70
PPMAA-8	19,46
PPMAA-9	19,20
PPMAA-10	22,28
PPMAA-11	17,41
PPMAA-12	16,89
PPMAA-13	20,29
PPMAA-14	19,52
PPMAA-15	30,66
PPMAA-16	29,34

**Tabel 4.** Kontribusi parameter terhadap derajat grafting

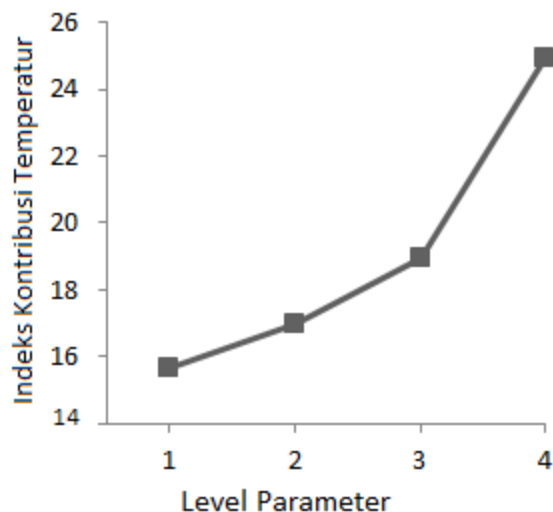
Parameter	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
Temperatur	15,67	16,98	18,94	24,95
%MAA	14,54	17,50	21,77	22,74
%DVB	17,20	18,09	20,12	21,14
Waktu	14,39	16,94	22,03	23,18

Kontribusi pengaruh temperatur terhadap %G PP-g-MAA ditunjukkan pada Gambar 2. Seiring dengan peningkatan temperatur dari 150-180°C diikuti juga dengan peningkatan %G. Hal ini sesuai dengan kinetika reaksi, meningkatnya temperatur menyebabkan molekul dalam sistem menjadi lebih reaktif dan menyebabkan terjadinya tumbukan yang lebih besar dan hal ini tentu akan meningkatkan nilai %G. Reaksi polimerisasi pada umumnya merupakan reaksi kompetitif antara terbentuknya produk grafting dan homopolimer daripada monomer yang digunakan, sehingga dengan meningkatnya temperatur reaksi juga memiliki peluang untuk terbentuknya

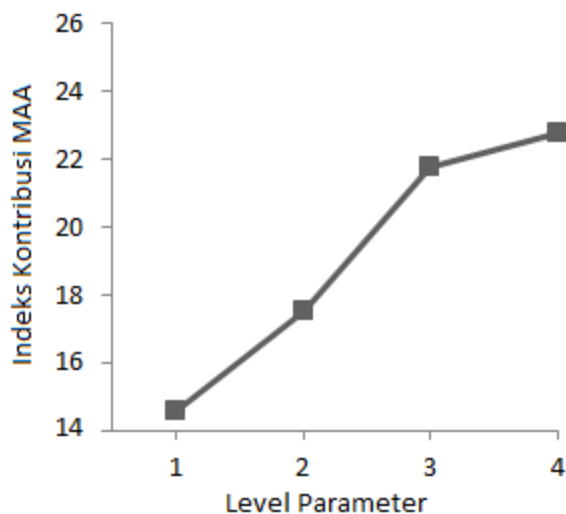
## Peningkatan Sifat Mekanis Polipropilena/Karet Alam Siklik dengan Penambahan Polipropilena-g-Asam Metakrilat (I Putu Mahendra)

---

radikal monomer yang berlebih dalam sistem sehingga memiliki peluang untuk terbentuknya homopolimer.



*Gambar 2.* Kontribusi pengaruh temperatur terhadap derajat grafting

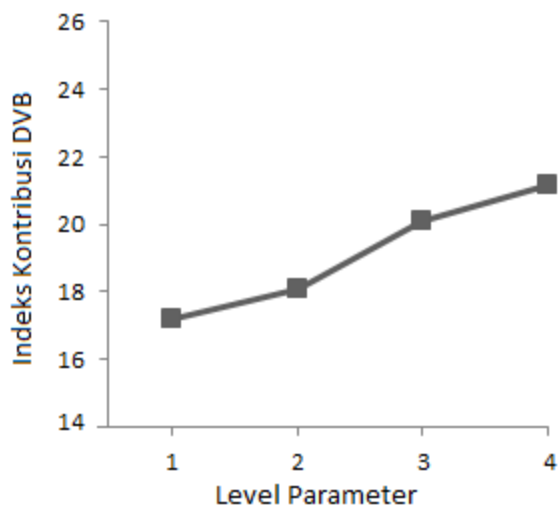


*Gambar 3.* Kontribusi pengaruh asam metakrilat terhadap derajat grafting

Dilain sisi, konsentrasi MAA 5-20% memiliki kontribusi positif terhadap peningkatan nilai %G (Gambar 3). Namun demikian, bila dilihat dari bentuk kurva yang memiliki kecenderungan akan mengalami penurunan pada konsentrasi asam metakrilat >20%, hal ini dapat dijelaskan oleh meningkatnya konsentrasi monomer dapat menyebabkan viskositas sistem

mengalami peningkatan, yang menyebabkan sistem menjadi lebih jenuh sehingga interaksi antara monomer dan rantai PP akan lebih sulit terjadi.

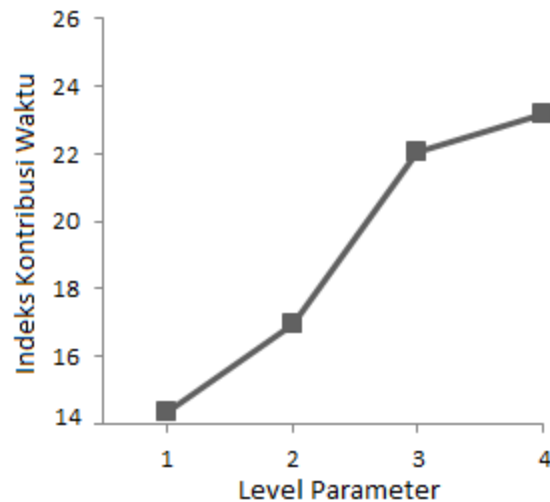
Divinil benzena (DVB) dalam reaksi ini diharapkan dapat berperan sebagai agen pengikat silang yang berdampak pada meningkatnya jumlah molekul asam metakrilat yang terikat pada rantai PP. Pemanfaatan DVB dalam reaksi memiliki kontribusi positif dengan meningkatnya nilai %G (Gambar 4). Pemanfaatan DVB sebagai agen pengikat silang didasari oleh pemanfaatan stirena yang umumnya digunakan sebagai komonomer untuk meningkatkan peluang terjadinya grafting. Hal ini didasari oleh gugus vinil yang terdapat pada stirena ataupun DVB yang mana ikut terlibat dalam proses resonansi molekul tersebut sehingga baik stirena ataupun divinilbenzena merupakan molekul yang kaya dengan awan elektron sehingga kebolehdjian terjadinya reaksi akan semakin tinggi.



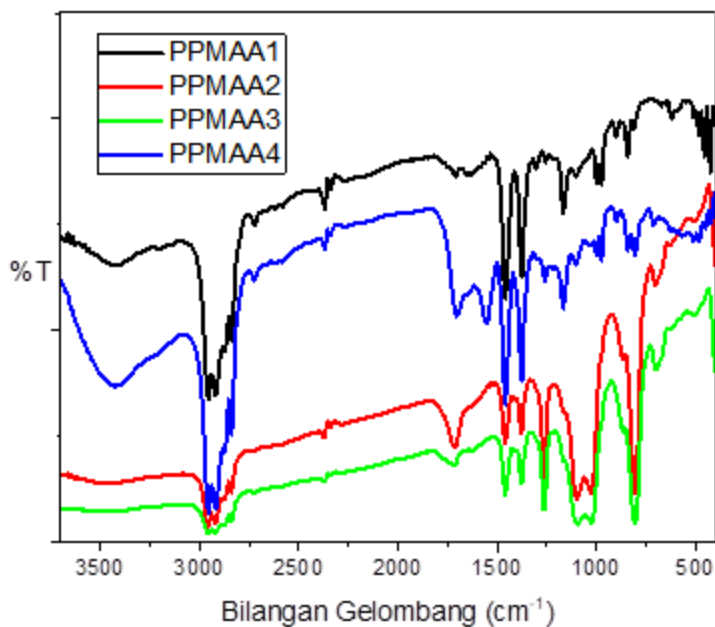
**Gambar 4.** Kontribusi pengaruh divinilbenzena terhadap derajat grafting

Pada Gambar 5 dapat dilihat bahwa pada rentang 30-180 menit reaksi modifikasi PP dengan MAA memiliki kontribusi positif terhadap peningkatan %G. Namun, serupa dengan pengaruh penambahan monomer, dengan bertambahnya rentang waktu reaksi, %G memiliki kecenderungan untuk mengalami penurunan hal ini berkaitan dengan komposisi reaktan yang masih tersedia dalam rentang waktu tertentu.





Gambar 5. Kontribusi pengaruh waktu terhadap derajat grafting

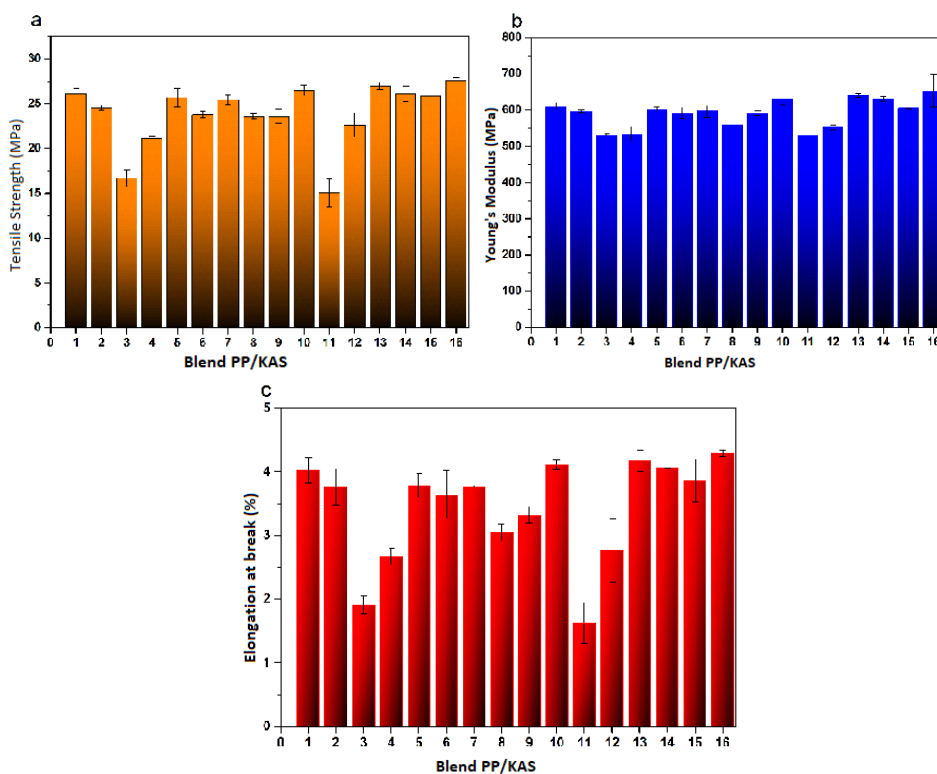


Gambar 6. Spektre FTIR PPMAA1, PPMAA2, PPMAA3, dan PPMAA4

Konfirmasi terbentuknya PP-g-MAA dilakukan dengan analisis FT-IR (Gambar 6). Pada Gambar 6, terdapat puncak khas yang dapat dipergunakan untuk mengonfirmasi proses grafting telah berlangsung pada permukaan PP. Puncak khas tersebut muncul pada bilangan gelombang 3496, 2965, 1704, 1615, dan 1083cm<sup>-1</sup> yang berasal dari vibrasi ikatan O-H dari asam metakrilat, C-C berasal dari rantai utama polipropilena, C=O berasal dari gugus karbonil asam metakrilat, C=C berasal dari divinil benzena dan

puncak terakhir diperkirakan berasal dari ikatan C-O asam metakrilat. Perbedaan intensitas tiap puncak khas tersebut dikarenakan oleh perbedaan kuantitas monomer/komonomer yang dipergunakan dalam formulasi. Perbedaan ini memberikan pengaruh yang signifikan pada sifat mekanis dan morfologi permukaan blend PP/KAS (Gambar 7 dan Gambar 9).

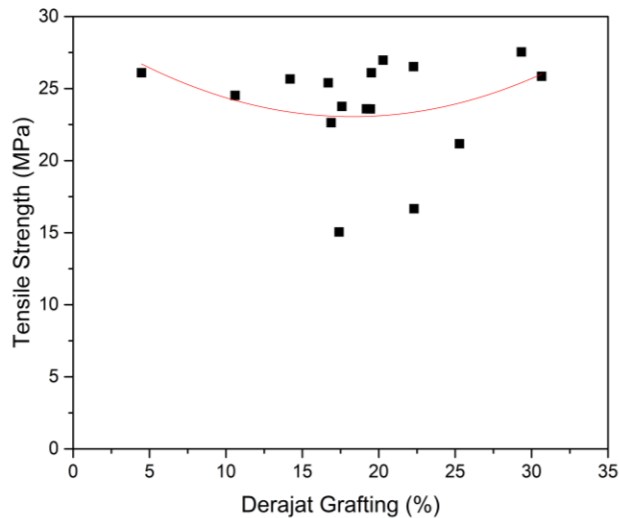
Sifat mekanis blend PP/KAS dengan penambahan *adhesion promoter* PP-g-MAA memberikan nilai yang bervariasi. Secara keseluruhan nilai *Tensile strength*, *Young's Modulus* dan *Elongation at break* dari 16 sampel blend PP/KAS mengalami peningkatan dibandingkan dengan PP/KAS tanpa penambahan *adhesion promoter* (*Tensile strength* 19,61 MPa, *Young's Modulus* 587 MPa dan *Elongation at break* 2,34%). Hubungan antara nilai %G dan *Tensile strength* ditunjukkan pada Gambar 8.



**Gambar 7.** Sifat mekanis (*tensile strength*, *Young's Modulus*, *Elongation at break*) blend PP/KAS

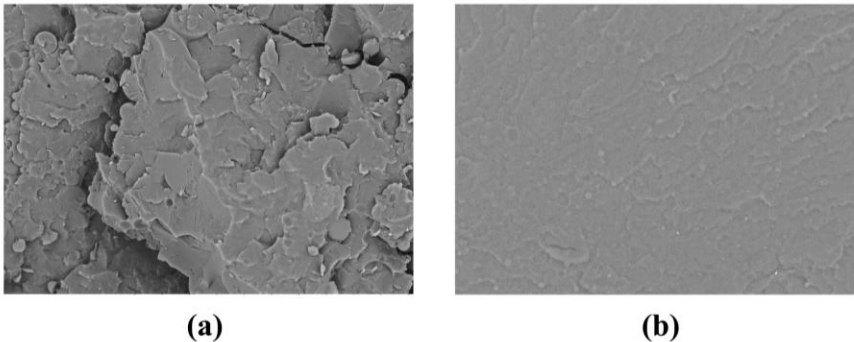
Pada Gambar 8, pasca proses *curve fitting* tampak bahwa tidak terdapat hubungan linear antara %G dan *tensile strength*. Hal ini dapat disebabkan oleh panjang rantai akrilat yang terbentuk selama proses polimerisasi tidak dapat dikontrol, menimbang reaksi polimerisasi yang dilakukan

menggunakan metode polimerisasi dengan pembentukan radikal bebas yang tidak terkontrol.



**Gambar 8.** Korelasi derajat grafting dengan *tensile strength*

Korelasi penambahan *adhesion promoter* PP-g-MAA terhadap kompatibilitas blend PP/KAS dapat diamati dengan analisis morfologi patahan blend PP/KAS pasca pengujian sifat mekanis (Gambar 9).



**Gambar 9.** Morfologi permukaan blend PP/KAS, (a) tanpa *adhesion promoter*, dan (b) dengan *adhesion promoter*

Hasil analisis morfologi blend PP/KAS pada Gambar 9 menunjukkan bahwa kompatibilitas blend PP/KAS mengalami peningkatan pasca penambahan *adhesion promoter* PP-g-MAA hal ini sesuai dengan meningkatnya nilai *Young's modulus* meningkatkan kekakuan (*stiffness*) material dan menyatakan bahwa kedua matriks dalam blend tersebut terdispersi dengan sempurna [12,13]. Berdasarkan pernyataan tersebut turut

mendukung bahwa dengan penambahan *adhesion promoter* PP-g-MAA dapat meningkatkan kompatibilitas blend PP/KAS.

## KESIMPULAN

Material *adhesion promoter* PP-g-MAA yang didesain dengan *Quaitek V4.0* memiliki nilai %G 4-30%. Variasi nilai tersebut dipengaruhi oleh perbedaan parameter temperatur, %DVB, %MAA dan waktu reaksi yang digunakan dalam proses polimerisasi. Penggunaan PP-g-MAA dalam blend PP/KAS dapat meningkatkan sifat mekanis bahan (*Tensile strength*, *Young's Modulus* dan *Elongation at Break*). Tidak terdapat korelasi linear antara nilai %G dengan sifat mekanis bahan yang disebabkan oleh perbedaan panjang rantai akrilat yang terbentuk selama proses polimerisasi tidak terkontrol. Namun, dengan penambahan *adhesion promoter* PP-g-MAA pada blend PP/KAS dapat meningkatkan kompatibilitas material yang dinyatakan dengan diperolehnya permukaan yang memiliki dispersi yang baik.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kepada Ristek Dikti atas hibah PMDSU sehingga penelitian dapat diselesaikan dan dipaparkan dalam Seminar Nasional Polimer 2017.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Marketsandmarkets. Plastics for passenger cars : Global trends & forecasts to 2016 - by Types & Geography plastics for passenger cars : Global trends & forecasts to 2016 - by Types. 2016. Diakses pada 2 Juni 2017.  
<http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/automotiveplastics-market-passenger-cars-506.html>.
- [2]. Lawniczak JE, Williams KA, Germinario LT. Characterization of adhesion performance of topcoats and adhesion promoters on TPO substrates. *J Coatings Technol Res* 2005;2(5):399-405.
- [3]. Awaja F, Gilbert M, Kelly G, Fox B, Pigram PJ. Adhesion of polymers. *Prog Polym Sci* 2009;34(9):948-68.
- [4]. Ryntz RA. Coating adhesion to low surface free energy substrates. *Prog Org Coatings* 1994;25(1):73-83.

- [5]. Ryntz RA. The effects of thermoplastic poly(olefin) (TPO) morphology on subsequent paintability and thermal shock performance. *Prog Org Coatings* 1996;27(1-4):241-54.
- [6]. Brannon H. The development of novel adhesion promoters for waterborne coatings and polypropylene car bumpers. Birmingham: University of Birmingham; 2014.
- [7]. Hintze-brüning H, Borgholte H. Coating of untreated polypropylene with halogen free aqueous materials. *Prog Org Coatings* 2000;40:49-54.
- [8]. Brewis DM, Briggs D. Adhesion to polyethylene and polypropylene. *Polymer (Guildf)* 1981;22(1):7-16.
- [9]. Hart MA. Evaluation of stain blocking primer coatings with low volatile. California: California Polytechnic State University; 2011.
- [10]. Schellekens M, Twene D, Van Der Waals A. Block copolymers for waterborne coatings-a novel eco-friendly approach for improved coating adhesion to untreated polypropylene based plastics. *Prog Org Coatings* 2011;72(1-2):138—43.
- [11]. Mazhar M, Abdouss M, Shariatinia Z, Zargaran M. Graft copolymerization of methacrylic acid monomers onto polypropylene fibers. *Chem Ind Chem Eng Q* 2014;20(1):87-96.
- [12]. Franco-Marquès E, Méndez JA, Pèlach MA, Vilaseca F, Bayer J, Mutjé P. Influence of coupling agents in the preparation of polypropylene composites reinforced with recycled fibers. *Chem Eng J* 2011;166(3):1170-8.
- [13]. Yao H, Niu J-L, Zhang J, Ning N-Y, yang X-Q, Tian M, Sun X-L, Zhang L-Q, Yan S-K. Morphologies and mechanical properties of cis-1,4-butadiene rubber/polyethylene blends. *Chinese J. Polym. Sci* 2016;34(7):820-9.