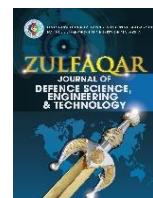




ZULFAQAR Journal of Defence Science, Engineering & Technology

Journal homepage: <https://zulfaqar.upnm.edu.my/>



SIFAT MEKANIKAL KOMPOSIT EPOKSI MONTMORILLONITE TERAWAT DIPERKUKUH CECAIR GETAH ASLI TEREPOKSIDA

Ku Zarina Ku Ahmad^{a,*}, Sahrim Ahmad^b, Rozaidi Rasid^b

^a Fakulti Kejuruteraan, Universiti Pertahanan Nasional Malaysia, Kem Sg Besi, 57000 Kuala Lumpur, Malaysia

^b Materials Science Programme, School of Applied Physics, Faculty of Science and Technology, Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia.

*Corresponding author: kuzarina@upnm.edu.my

ARTICLE INFO

Article history:

Received

19-10-2019

Received in revised

14-09-2020

Accepted

22-02-2021

Available online

30-06-2021

Keywords:

Cecair getah asli
terepoksida,
montmorillonite,
kekuatan hentaman,
keliatan patah.

ABSTRAK

Kajian ini telah dijalankan dengan menghasilkan dua sistem komposit iaitu komposit epoksi berpengisi montmorillonite (MMT) dengan dan tanpa cecair getah asli terepoksida (LENR) secara kaedah pencampuran *in situ*. Komposit telah di pra-matang pada tiga suhu iaitu pada suhu 30 °C, 50 °C atau 70 °C. Kedua dua sistem dimatang pada suhu 130 °C atau 140 °C. Ujian hentaman Izod dan ujian keliatan patah ke atas komposit yang dihasilkan menunjukkan peningkatan maksimum sebanyak 44% dengan penambahan MMT dan 29% peningkatan dengan penambahan getah asli terepoksida. Selain kandungan MMT, suhu pra matang 70 °C memberikan kesan yang ketara terhadap kekuatan hentaman dan keliatan patah sistem epoksi berpengisi MMT. Suhu pra-matang 50 °C merupakan suhu yang optimum dan berupaya memberikan kekuatan hentaman dan keliatan patah yang baik kepada sistem epoksi berpengisi MMT getah asli terepoksida. Suhu matang bagi kedua dua sistem tidak memberikan kesan yang ketara kepada sifat mekanikal kedua dua sistem komposit ini. Pemeriksaan mikrostruktur melalui mikroskop elektron transmisi menunjukkan MMT tertabur dengan susunan interkalasi. Peningkatan kandungan MMT melebihi 1 % berat menunjukkan kehadiran taktoid dan penggumpalan silikat.

e-ISSN: 2773-5281

Type: Article

ABSTRACT

This study was conducted by producing two composite systems, namely montmorillonite-containing epoxy composites (MMT) with and without epoxidized natural rubber liquid (LENR) by *in situ* mixing method. The composite was pre-cure at three temperatures at 30 °C, 50 °C or 70 °C. Both systems are cured at a temperature of 130 °C or 140 °C. Izod impact test and fracture toughness test on the resulting composite showed a maximum increase of 44% with the addition of MMT and a 29% increase with the addition of epoxidized natural rubber. In addition to the MMT content, the pre-cure temperature of 70 °C has a significant effect on the impact strength and fracture toughness of the MMT-filled epoxy system. The pre-cure temperature of 50 °C is the optimum temperature and is able to provide good impact strength and fracture toughness to the epoxy system containing MMT epoxidized natural rubber. The curing temperatures of both systems do not significantly affect the mechanical properties of these two composite systems. Observation of the microstructure through the transmission electron microscope

showed that MMT was dispersed in an intercalation arrangement. An increase in the content of MMT above 1% by weight indicates the presence of tactoids and silicate aggregation.

© 2021 UPNM Press. All rights reserved.

Pengenalan

Komposit polimer yang mengandungi pengisi nanozarah merupakan salah satu penyelidikan yang memberikan keputusan yang memberangsangkan dalam bidang bahan termaju(Okada & Usuki, 2006). Kelebihan bahan ini adalah ketumpatan yang rendah, pemprosesan yang ringkas dan sifat yang mudah diubahsuai. Terdapat banyak polimer sama ada termoset atau termoplastik di dalam pasaran yang boleh dijadikan pilihan sebagai matrik. Epoksi merupakan salah satu resin daripada kumpulan termoset yang mendapat perhatian di pasaran kerana sifat mekanik yang baik serta rintangan terhadap kakisan dan kimia (Donnet, 2003). Selain itu, ia juga mempunyai sifat terma yang sangat bersesuaian dengan kebanyakan aplikasi dalam industri. Walau bagaimanapun, sifat kerapuhan yang tinggi mengehadkan keupayaan epoksi untuk digunakan dalam aplikasi yang memerlukan keliatan yang baik (Kumar & Kothandaraman, 2008; Y. Zhou et al., 2006). Justeru itu, banyak kaedah dan teknik telah digunakan untuk meningkatkan keliatan epoksi termasuklah penggunaan pelbagai jenis pengisi dengan pelbagai variasi dalam bentuk, saiz dan dimensi (Liao et al., 2004; Rodgers et al., 2005; Y. Zhou et al., 2006). Selain itu penggunaan partikel getah juga menunjukkan peningkatan dalam nilai keliatan patah komposit epoksi yang dihasilkan (Ahmed et al., 2015; Arroyo et al., 2007) .

Penambahan getah di dalam epoksi telah diperakui dapat meningkatkan keliatan patah komposit. Penambahan getah ini dibuat dengan pelbagai kaedah dan teknik. Namun begitu penggunaan cecair getah didapati memberikan kepelbagaiannya dalam sifat komposit epoksi yang dihasilkan. Antara cecair getah yang digunakan secara meluas adalah LENR (Abu Bakar et al., 2011; Ratim et al., 2018), cecair ATBN (Kelnar et al., 2020; Kim & Mai, 1991; Szymańska et al., 2018), CTBN (Auad et al., 2001; Vijayan P et al., 2017), HTPB (Kou et al., 2018; Ozturk et al., 2001; Yi et al., 2020), ETBN (Gouda et al., 2017; Li et al., 2017; Verchere et al., 1991) dan akrilonitril (Neisiany et al., 2018; Ozdemir et al., 2016; Pereira Soares et al., 2002) telah menunjukkan peningkatan dalam keliatan komposit epoksi yang terhasil.

Montmorillonite (MMT) merupakan nanozarah yang paling banyak digunakan dalam penyelidikan berdasarkan morfologi interkalasi dan pengelupasan yang telah meningkatkan sifat matriks polimer. Komposit polimer MMT ini didapati memberikan sifat mekanik, sifat sawar dan perencat nyalaan yang baik (Cheng et al., 2020; Chotisawan et al., 2019; Liu & Wagner, 2005; L. Zhou et al., 2018). Sejak berdekad yang lalu, banyak kajian telah dijalankan dengan menggunakan partikel MMT disebabkan kosnya yang lebih murah, mudah di ubahsuai dan mudah didapati di pasaran. Penambahan pengisi dan LENR di dalam projek ini disasarkan mampu memperbaiki sifat kerapuhan matriks epoksi supaya komposit ini dapat digunakan dalam aplikasi struktur mekanikal yang lebih fleksibel.

Metodologi

Bahan

Cecair getah terepoksi telah disediakan daripada ENR 50 yang diperolehi daripada Lembaga Getah Malaysia (LGM) manakala resin epoksi jenis Morcote BJC 39 dengan ketumpatan 1.421 gcm^{-3} dan pematang amina. MMT yang digunakan dalam kajian ini adalah daripada jenis tanah liat montmorillonite (MMT) dengan nama komersil Cloisite 30B. MMT ini diperolehi daripada Syarikat Southern Clay (M). Cloisite 30B adalah MMT terawat permukaan dengan pemodifikasi organik: garam kuantinari ammonium metil tallow bis (hidroksietil), (MT2EtOH).

Kaedah

Penyediaan Komposit sistem epoksi berpengisi MMT terawat dan komposit epoksi berpengisi MMT cecair getah asli terepoksida disediakan berpanduan beberapa langkah. MMT terawat telah dicampurkan dengan aseton yang bertindak sebagai agen penyerak dan disonikasi. Resin epoksi kemudiannya dicampurkan, dikacau dengan pengaduk mekanik dengan kelajuan 1000 rpm selama 30 minit dan disonikasi kali kedua. Campuran kemudiannya dinyahgas selama 2 jam untuk mengeluarkan agen penyerak yang masih tertinggal dan membuang gelembung udara yang terperangkap. Seterusnya agen pematang dimasukkan ke dalam campuran dengan nisbah epoksi kepada agen pematang ialah 3:1 dan diaduk selama 3 minit. Campuran tersebut dinyahgas kali kedua dan dituang ke dalam acuan plat keluli tahan karat berukuran panjang * lebar (13mm*13mm) berketalan 3mm untuk ujian hentaman dan berketalan 5mm untuk ujian keliatan patah. Campuran komposit ini kemudiannya telah melalui proses pra-matang pada suhu 30 °C , 50 °C , 70 °C dan juga dimatang pada suhu 130 °C dan 140 °C.

Bagi komposit epoksi berpengisi MMT terawat cecair getah asli terepoksida, 5 % berat LENR akan dicampur terlebih dahulu dengan agen penyerak dan diaduk selama 30 minit diikuti oleh penambahan (0.5%, 1.0%, 1.5%) berat MMT. Campuran ini kemudiannya disonikasi. Resin epoksi kemudiannya dicampurkan, dikacau dengan pengaduk mekanik 1000 rpm selama 30 minit dan disonikasi serta dinyahgas. Campuran dicampurkan dengan agen pematang dan dinyahgas dan dituang ke dalam acuan keluli tahan karat. Campuran di pra-matang dan dimatang pada suhu yang telah ditetapkan. Label bagi setiap spesimen dinyatakan di dalam Jadual 1.

Jadual 1: Label spesimen bagi setiap pencirian

Label spesimen	Suhu pra-matang (°C)	Suhu matang (°C)
30 130	30	130
50 130	50	130
70 130	70	130
30 140	30	140
50 140	50	140
70 140	70	140

Pencirian

Ujian kekuatan hentaman Izod

Ujian kekuatan hentaman Izod dijalankan menggunakan mesin Ray Ran Pendulum Impact Sistem berdasarkan ASTM D256- 10(2018) pada suhu bilik. Berat penukul yang digunakan adalah 0.459 kg, kelajuan penukul adalah 3.46 ms⁻¹ manakala tenaga hentaman adalah 2.76 Joul. Mod ujian dijalankan menggunakan sampel berlekuk di mana kegagalan daripada hentaman dihadkan berlaku pada lokasi pelekukan sahaja.

Ujian keliatan patah pula dilakukan dengan mesin testometrik berdasarkan piawaian ASTM D5045. Panjang tolok yang digunakan adalah 80 mm dengan kelajuan kepala rentas 2 mm/min. Keliatan patah, K_{IC} bagi spesimen ujian ini dikira berdasarkan persamaan 1 dan 2 berikut:

$$K_{IC} = (PS/tw^{3/2})y \quad (1)$$

$$y = 3\sqrt{\frac{a}{w}} 1.99 - \frac{\left(\frac{a}{w}\right) \left[1 - \left(\frac{a}{w}\right) \left[2.15 - 3.93 \left(\frac{a}{w}\right) + 2.7 \left(\frac{a}{w}\right)^2 \right] \right]}{2 \left[1 + 2 \left(\frac{a}{w}\right) \right] \left[1 - \left(\frac{a}{w}\right)^{\frac{3}{2}} \right]} \quad (2)$$

di mana:

P = beban maksimum, S = jarak tolok, t = tebal spesimen, w = lebar spesimen, a = panjang rekahan dan y = faktor geometri

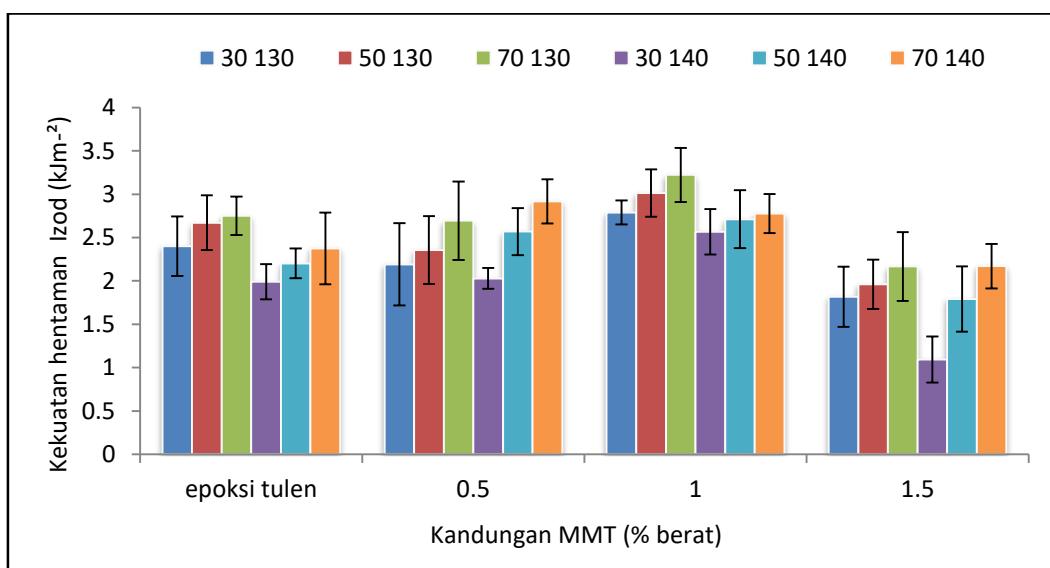
Morfologi permukaan patahan akan dikaji menggunakan mikroskop pancaran medan imbasan electron (FESEM). Mesin FESEM yang digunakan dalam kajian ini adalah Zeiss Supra-55VP. Spesimen di dalam kajian ini disalut dengan lapisan emas yang bertindak sebagai lapisan konduktor untuk meningkatkan kecekapan pemerhatian mikroskopi. Mikroskop transmisi elektron (TEM) mempunyai magnifikasi yang lebih tinggi mikroskop imbasan electron akan digunakan bagi analisis yang dijalankan. Selain itu, sampel yang disediakan amat nipis dan memerlukan ketelitian semasa proses pemotongan. Ketebalan sampel adalah di antara 50nm-100nm. Dalam kajian ini model TEM yang digunakan adalah Philips – CM12.

Keputusan dan Perbincangan

Kekuatan hentaman

Rajah 1 menunjukkan graf kekuatan hentaman komposit epoksi berpengisi MMT terawat. Kekuatan hentaman akan meningkat dengan penambahan kandungan MMT. Keputusan ujian menunjukkan kandungan MMT 1.0% berat merupakan kandungan optimum bagi kedua dua suhu matang. Penambahan pengisi dilihat dapat meningkatkan kekuatan hentaman namun begitu kekuatan hentaman telah menurun dengan ketara apabila pertambahan MMT adalah 1.5% berat kerana MMT ini telah agglomerat dan bertindak sebagai pemula tegasan yang akan melemahkan kekuatan hentaman (Isik et al., 2003; Rafiq et al., 2017).

Agglomerat MMT terhasil disebabkan oleh terjadinya pembentukan fasa terpisah antara matrik dan pengisi. Struktur interkalasi yang terhasil juga berpotensi menghasilkan agglomerat apabila ruang antara lapisan silikat meningkat dan wujudnya daya tarikan antara lapisan menyebabkan lapisan bertindak dan terhasilnya agglomerat MMT yang menjelaskan sifat mekanik komposit (Rafiq et al., 2017; Utracki & Kamal, 2002) Kehadiran agglomerat ini dapat dibuktikan daripada pemerhatian mikroskopi.

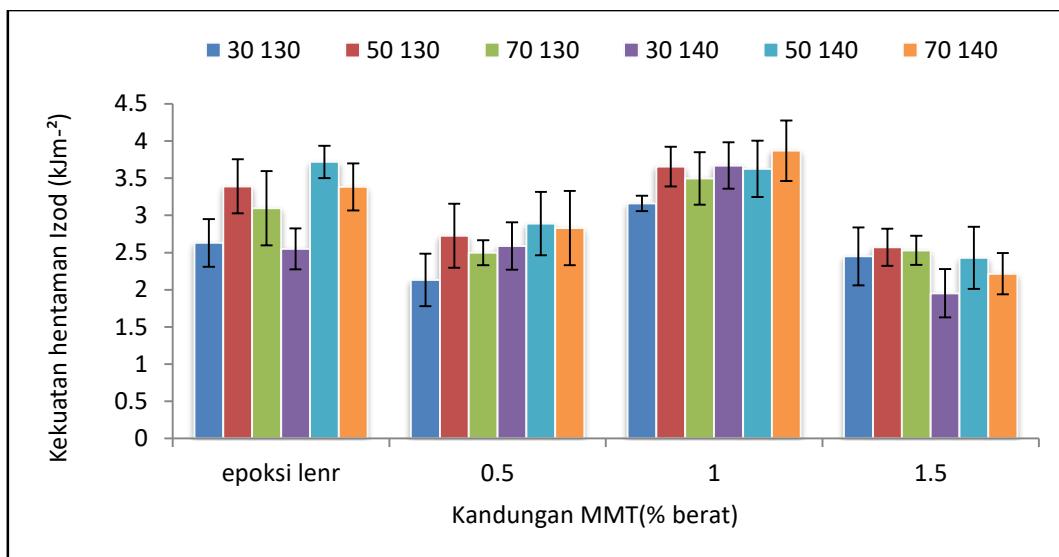


Rajah 1. Kesan kandungan MMT dan suhu pra-matang ke atas kekuatan hentaman bagi komposit epoksi MMT terawat yang dimatang pada suhu 130 °C dan suhu 140 °C

Selain kesan penambahan pengisi MMT terawat, suhu pra-matang juga memberikan kesan yang ketara terhadap nilai kekuatan hentaman. Peningkatan suhu pra-matang memberikan nilai kekuatan hentaman yang lebih baik pada kedua dua suhu matang. Keadaan ini boleh dijelaskan oleh pergerakan molekul yang pantas pada suhu yang lebih tinggi. Molekul epoksi yang bergerak pantas membentarkan penembusan yang lebih baik di dalam ruang antara lapisan MMT yang dapat membantu menyerakkan lapisan tersebut. Pada suhu pra-matang yang lebih tinggi, pergerakan molekul agen pematang yang pantas membentarkan penembusan antara ruang antara lapisan MMT dan bertindak dengan molekul epoksi yang telah terdapat di situ. Ini juga membantu menyerakkan lapisan MMT (Ngo et al., 2007).

Rajah 2 menunjukkan kekuatan hentaman epoksi berpengisi MMT terawat diperkuuh LENR pada suhu matang 130 °C dan suhu 140 °C. Sistem ini memberikan tren yang berbeza berbanding sistem

sebelumnya di mana kekuatan hentaman dilihat terjejas apabila nanozarah ditambah ke dalam sistem. Namun begitu, peningkatan seterusnya telah meningkatkan kekuatan hentaman. Namun begitu peningkatan seterusnya telah menurunkan kekuatan hentaman yang mungkin berpunca daripada interaksi yang lemah antara matriks, pengisi dan juga LENR yang bertindak sebagai agen pengukuhan (Wang et al., 2006). Kandungan 1% berat masih dilihat sebagai kandungan optimum di dalam sistem ini. Jadual 2 menunjukkan perbandingan nilai kekuatan hentaman Izod bagi sistem MMT terawat tanpa LENR dan diperkuuh LENR.



Rajah 2. Kesan kandungan MMT dan suhu pra-matang ke atas kekuatan hentaman bagi komposit epoksi MMT terawat LENR yang menjalani proses pematangan pada suhu 130 °C dan suhu 140 °C

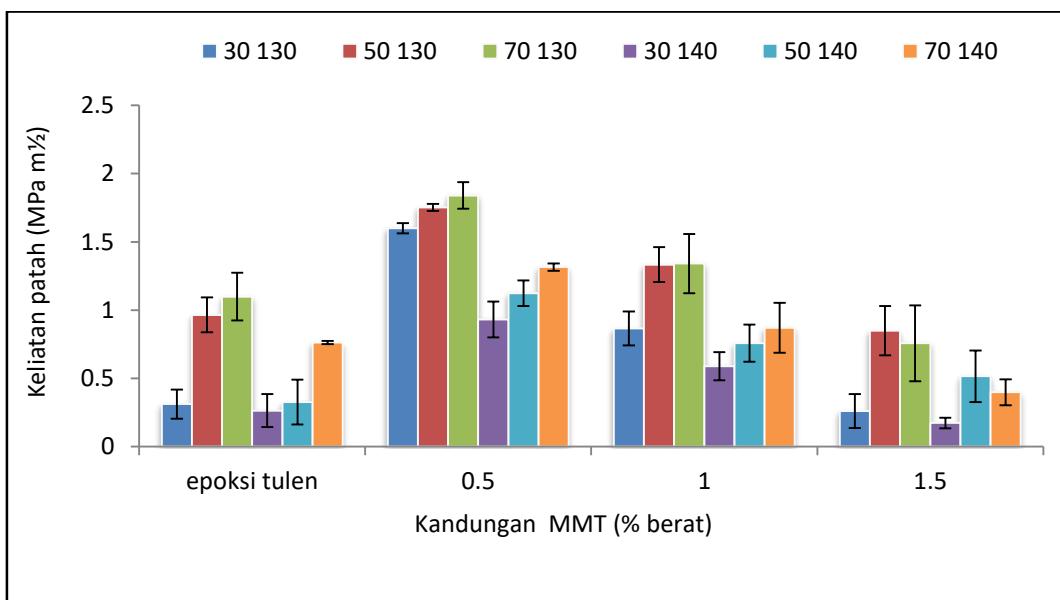
Jadual 2. Kekuatan hentaman Izod bagi sistem tanpa LENR dan diperkuuh LENR

Sistem komposit	Kekuatan hentaman Izod epoksi MMT terawat tanpa LENR (kJm⁻²)				Kekuatan hentaman Izod epoksi MMT terawat diperkuuh LENR (kJm⁻²)			
	epoksi tulen	0.5	1	1.5	epoksi lenr	0.5	1	1.5
30 130	2.4	2.2	2.8	1.8	2.6	2.1	3.2	2.4
50 130	2.7	2.4	3.0	2.0	3.4	2.7	3.7	2.6
70 130	2.8	2.7	3.2	2.2	3.1	2.5	3.5	2.5
30 140	2.0	2.0	2.6	1.1	2.5	2.6	3.7	2.0
50 140	2.2	2.6	2.7	1.8	3.7	2.9	3.6	2.4
70 140	2.4	2.9	2.8	2.2	3.4	2.8	3.9	2.2

Bagi kajian kesan suhu pra-matang, 50 °C memberikan keputusan ujian kekuatan hentaman yang paling baik berbanding dua suhu pra-matang yang lain. Manakala suhu matang dilihat tidak memberikan kesan yang ketara terhadap kekuatan hentaman sistem komposit yang dikaji. Namun begitu ternyata penambahan LENR telah meningkatkan kekuatan hentaman sistem berbanding sistem epoksi MMT terawat yang tidak diperkuuh LENR. Kehadiran kumpulan berfungsi seperti -OH, C-O dan C=O di dalam LENR telah memperbaiki ikatan antara muka di antara matriks dan MMT. Kusmono et al. (2013), Mohammad et al. (2018) dan Thomas et al., (2008) juga melaporkan perkara yang sama di dalam kajian mereka terhadap sistem epoksi.

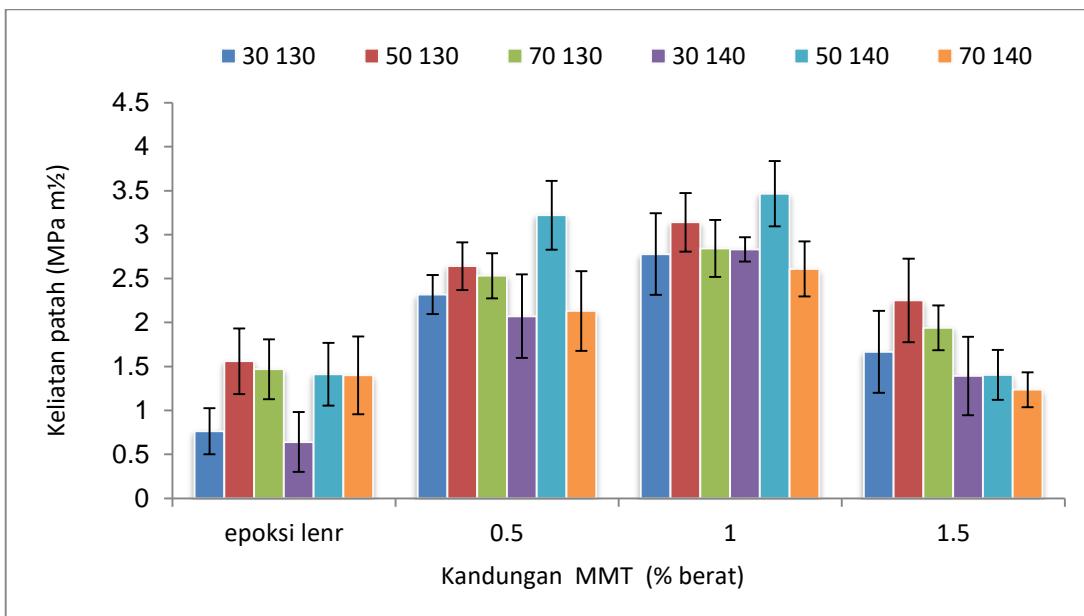
Keliatan Patah

Rajah 3 adalah keputusan ujian keliatan patah yang dijalankan ke atas sampel epoksi MMT terawat pada suhu matang 130°C dan 140°C . Keputusan ujian keliatan patah memberikan tren yang hampir sama dengan ujian hentaman. Penambahan MMT terawat memberikan peningkatan kepada nilai keliatan patah dan nilai ini kemudiannya menurun dengan peningkatan pengisi. Namun begitu, berdasarkan rajah yang dipaparkan, kandungan optimum MMT pada kedua dua suhu matang adalah 0.5% berat berbanding 1.0% berat di dalam ujian hentaman. Kedua dua ujian memberikan perbezaan disebabkan teknik dan prinsip pengujian yang berbeza. Namun begitu, kandungan 1.0% berat MMT masih memberikan peningkatan dibandingkan dengan 1.5% berat MMT. Peningkatan suhu pra-matang juga telah meningkatkan keliatan patah namun begitu, sistem yang dimatang pada suhu 130°C mempunyai nilai keliatan patah yang lebih tinggi berbanding suhu 140°C . Tren yang sama juga dipamerkan di dalam nilai kekuatan hentaman sistem ini.



Rajah 3. Kesan kandungan MMT dan suhu pra-matang ke atas keliatan patah bagi komposit epoksi MMT yang dimatang pada suhu 130°C dan 140°C

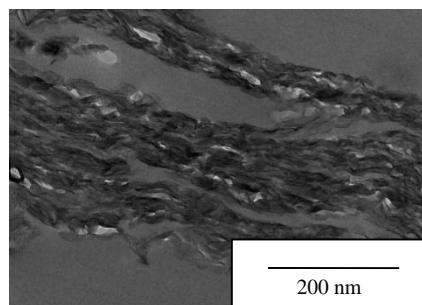
Keliatan patah epoksi MMT terawat LENR yang dimatang pada suhu pra-matang dan suhu matang berbeza ditunjukkan di dalam Rajah 4. Nilai keliatan patah memberikan peningkatan dengan penambahan pengisi sehingga kandungan optimum dicapai, keliatan patah menunjukkan penurunan selepas nilai tersebut. Tren yang sama seperti yang dipaparkan di dalam spesimen epoksi MMT terawat (Rajah 3). Kandungan optimum pengisi di dalam sampel diperkuuh LENR adalah 1.0%. Peningkatan pengisi seterusnya menjelaskan nilai keliatan patah dengan pengurangan nilai K_{IC} menunjukkan sampel semakin rapuh. Spesimen epoksi LENR menunjukkan peningkatan pada suhu pra-matang 50°C pada kedua dua suhu matang. Suhu matang tidak memberikan kesan yang ketara terhadap keliatan patah.



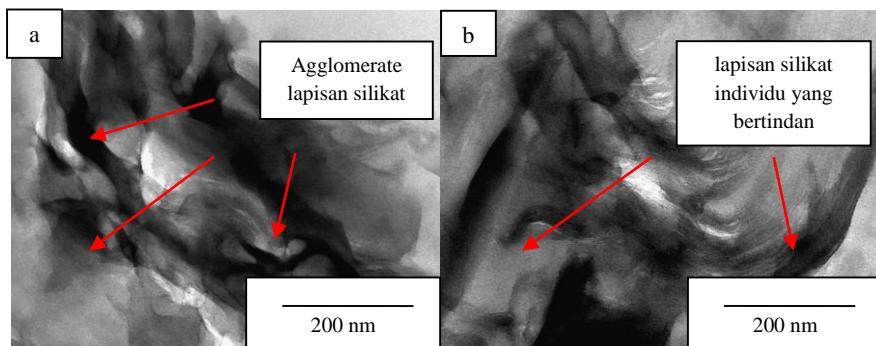
Rajah 4. Kesan kandungan MMT dan suhu pra-matang ke atas keliatan patah bagi komposit epoksi MMT TERAWAT LENR dimatang pada suhu 130° dan suhu 140°

Pemeriksaan Morfologi

Hasil daripada pemeriksaan TEM (Rajah 5), penggumpalan silikat pada komposisi 1.5% berat MMT terawat adalah ketara. Morfologi yang hadir adalah interkalasi secara rawak. Melalui pemerhatian TEM, penyerakan MMT terawat dapat dilihat dengan lebih ketara pada suhu pra-matang berbeza (Rajah 6). Pada suhu pra-matang 70°C , MMT dilihat mempunyai struktur interkalasi yang lebih ketara manakala pada suhu pra-matang suhu bilik, morfologi yang hadir adalah gabungan struktur interkalasi yang terdiri daripada lapisan platelet MMT terawat bertindan dan juga taktoid silikat. Ini berpunca daripada peresapan epoksi ke dalam lapisan silikat adalah lebih baik pada ketika proses pra-matang pada suhu tinggi. Kusmono et al. (2013) dan Muralishwara et al. (2019) juga mencatatkan pemerhatian yang sama di dalam kajiananya terhadap sistem epoksi MMT di mana peningkatan komposisi MMT menyebabkan agglomeratan.



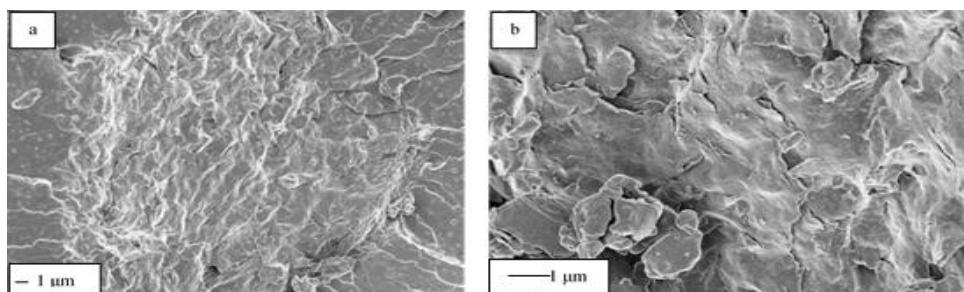
Rajah 5. Epoksi binari berpengisi 1.5 % berat MMT terawat yang dipra-matang pada suhu 70°C



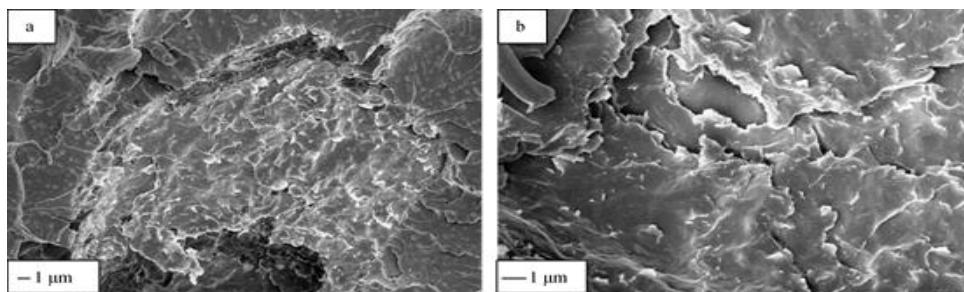
Rajah 6. Epoksi binari berpengisi 1.0 % berat MMT terawat yang dipra-matang pada suhu (a) 30°C dan (b) 70°C

Mikrograf bagi sistem epoksi MMT terawat LENR, ditunjukkan pada Rajah 7 dan Rajah 8. Dapat dilihat bahawa terdapat perbezaan pada permukaan patah spesimen yang dipra-matang pada suhu berbeza. Spesimen yang di pra-matang pada suhu yang lebih tinggi menunjukkan permukaan MMT tidak diselaputi oleh LENR membuktikan ikatan antaramuka yang lemah. Keadaan ini telah menjelaskan keupayaan MMT semasa pemindahan tegasan semasa beban dikenakan.

Struktur mikro bagi spesimen epoksi MMT terawat LENR adalah lebih baik kerana MMT terawat bersifat hidrofilik atau cita air yang berpunca daripada dua kumpulan hidroksietil yang wujud di dalam MMT ini. Cecair getah terepoksi yang digunakan di dalam kajian mempunyai kekutuhan yang amat serasi dengan epoksi. LENR merupakan getah asli yang diepoksidakan daripada 1,4 isoprena dan merupakan antara agen pengukuhan yang digunakan secara meluas sekarang (Bussi & Ishida, 1994; Hong & Chan, 2004). Arroyo et al. (2007) juga melaporkan bahawa ENR mempunyai sifat polar yang jauh lebih tinggi daripada getah asli. Ini merupakan salah satu penyebab peningkatan dan keseimbangan kekuatan mekanik yang dihasilkan oleh sistem LENR berbanding sistem tanpa LENR. Selain itu juga, kewujudan kumpulan berkutub di dalam epoksi memudahkan interkalasi ke dalam lapisan galeri MMT terawat (X. Kornmann et al., 2001).

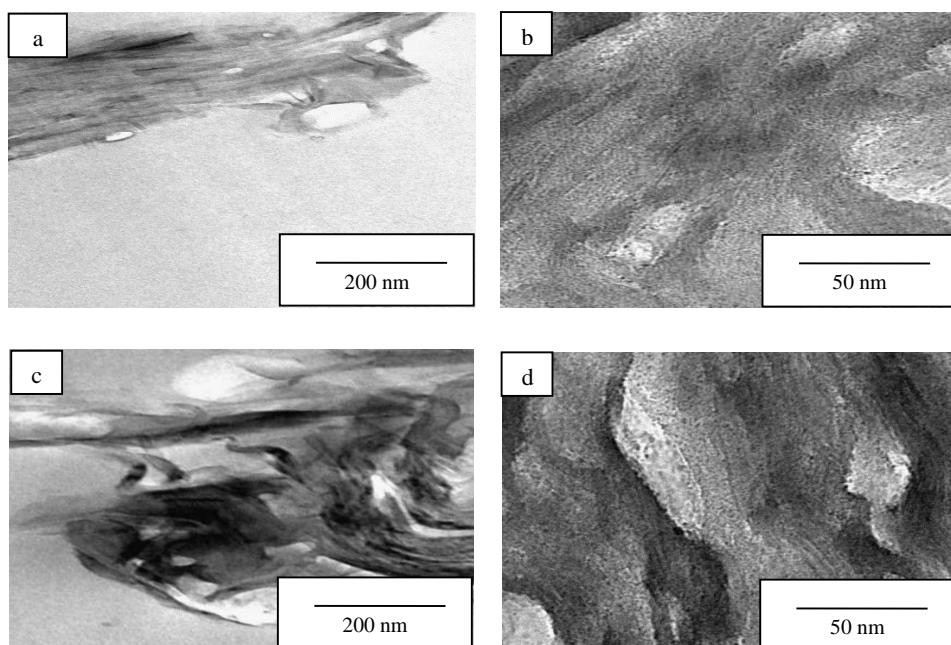


Rajah 7. Epoksi binari MMT terawat LENR yang dipra-matang pada suhu 50°C (a) pembesaran 2000X; (b) pembesaran 5000X



Rajah 8. Epoksi MMT terawat LENR yang dipra matang pada suhu 70°C (a) pembesaran 2000X; (b) pembesaran 5000X

Rajah 9 menunjukkan mikrograf TEM epoksi MMT terawat LENR di pra matang pada suhu 50 °C mempunyai morfologi interkalasi yang lebih seragam berbanding spesimen yang di pra-matang pada suhu 70 °C yang menunjukkan tindanan lapisan silikat. Mikrostruktur yang terhasil adalah dapat ditafsirkan berdasarkan kesan keserasian dan tindakbalas organo tanah liat ini dengan rantai polimer. Tindakbalas ikatan hidrogen yang kuat dan reaksi kimia antara epoksi dan kumpulan hidroksil yang berada pada galeri organo tanah liat memudahkan interkalasi resin epoksi menjurus kepada pengembangan jarak antara lapisan galeri yang akhirnya melemahkan tindakbalas antara lapisan silikat. Ini akan menghasilkan penyerakan lapisan silikat individu dengan struktur terkelupas (Eh Noum et al., 2014). Keserasian dan tindakbalas yang optimum antara matriks polimer, pengubahsuai organik dan permukaan lapisan silikat adalah faktor utama dalam penghasilan morfologi sama ada interkalasi ataupun terkelupas.



Rajah 9. (a) dan (b) Epoksi MMT terawat LENR yang dipra-matang pada suhu 50°C ; (c) dan (d) Epoksi MMT terawat LENR yang dipra-matang pada suhu 70°C pada pembesaran berbeza

Kesimpulan

Berdasarkan analisis mekanik yang dijalankan, penambahan MMT terawat memberikan kesan yang ketara terhadap sifat mekanik nanokomposit epoksi. Secara amnya penambahan sehingga 1.0 % berat MMT terawat telah meningkatkan kekuatan hentaman dan keliatan patah, penambahan seterusnya telah menjelaskan sifat mekanik yang diuji. Apabila LENR ditambah sebagai pengukuh matriks epoksi, kekuatan hentaman dan keliatan patah menujukkan peningkatan yang lebih baik. Peningkatan suhu pra-matang

meningkatkan sifat mekanik sistem epoksi berpengisi MMT terawat manakala suhu 50 °C merupakan suhu terbaik untuk pra-matang sistem epoksi berpengisi MMT terawat LENR.

Penghargaan

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universiti Kebangsaan Malaysia dan Universiti Pertahanan Nasional Malaysia di atas pembiayaan kewangan untuk menjayakan kajian ini.

Rujukan

- Abu Bakar, M. A., Ahmad, S. H. & Kuntjoro, W. (2011). Effects of lenr addition on mechanical properties of kenaf fibre reinforced epoxy composites. *International Journal of Plastics Technology*. <https://doi.org/10.1007/s12588-011-9014-0>
- Ahmed, M. A., Kandil, U. F., Shaker, N. O. & Hashem, A. I. (2015). The overall effect of reactive rubber nanoparticles and nano clay on the mechanical properties of epoxy resin. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.06.010>
- Arroyo, M., López-Manchado, M. A., Valentín, J. L. & Carretero, J. (2007). Morphology/behaviour relationship of nanocomposites based on natural rubber/epoxidized natural rubber blends. *Composites Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.09.019>
- Auad, M. L., Frontini, P. M., Borrajo, J. & Aranguren, M. I. (2001). Liquid rubber modified vinyl ester resins: Fracture and mechanical behavior. *Polymer*. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(00\)00773-4](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00773-4)
- Bussi, P. & Ishida, H. (1994). Partially miscible blends of epoxy resin and epoxidized rubber: Structural characterization of the epoxidized rubber and mechanical properties of the blends. *Journal of Applied Polymer Science*. <https://doi.org/10.1002/app.1994.070530407>
- Cheng, L., Jincheng, W., Wen, Z. & Shiqiang, S. (2020). Application properties of a cyclophosphamide-core polyamidoamine dendritic montmorillonite in natural rubber composites. *Polymers and Polymer Composites*. <https://doi.org/10.1177/0967391119879289>
- Chotisuan, S., Wannarit, K., Kaewna, P., Kardae, S., Chaisuksan, Y. & Roumcharoen, J. (2019). Fire-retardant Paper Based on Montmorillonite and Oil Palm Trunk Fibres. *Applied Science and Engineering Progress*. <https://doi.org/10.14416/j.ijast.2018.11.002>
- Donnet, J. B. (2003). Nano and microcomposites of polymers elastomers and their reinforcement. *Composites Science and Technology*. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00028-9](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00028-9)
- Eh Noum, S. Y., Ahmad, S., Rasid, R., Hock, Y. C., Seng, L. Y. & Tarawneh, M. A. (2014). Penyediaan dan pencirian nanokomposit epoksi berpenguat getah asli terepoksida. *Sains Malaysiana*.
- Gouda, P. S. S., Chatterjee, V., Siddaramaiah, Barhai, P. K. & Kumar, G. B. V. (2017). Fracture toughness of glass epoxy laminates using carbon nano particles and ETBN rubber. *Materials Performance and Characterization*. <https://doi.org/10.1520/MPC20170027>
- Hong, S. G. & Chan, C. K. (2004). The curing behaviors of the epoxy/dicyanamide system modified with epoxidized natural rubber. *Thermochimica Acta*, 417(1), 99–106. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2003.12.015>
- Isik, I., Yilmazer, U. & Bayram, G. (2003). Impact modified epoxy/montmorillonite nanocomposites: Synthesis and characterization. *Polymer*, 44(20), 6371–6377. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(03\)00634-7](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(03)00634-7)

- Kelnar, I., Zhigunov, A., Kaprálková, L., Krejčíková, S., Dybal, J. & Janata, M. (2020). Nano-modified epoxy: The effect of GO-based complex structures on mechanical performance. *RSC Advances*. <https://doi.org/10.1039/d0ra00202j>
- Kim, J. K. & Mai, Y. wing. (1991). High strength, high fracture toughness fibre composites with interface control-A review. *Composites Science and Technology*. [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(91\)90072-W](https://doi.org/10.1016/0266-3538(91)90072-W)
- Kornmann, X., Lindberg, H. & Berglund, L. A. (2001). Synthesis of epoxy-clay nanocomposites. Influence of the nature of the curing agent on structure. *Polymer*. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(00\)00801-6](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00801-6)
- Kou, Y., Zhou, W., Li, B., Dong, L., Duan, Y. E., Hou, Q., Liu, X., Cai, H., Chen, Q. & Dang, Z. M. (2018). Enhanced mechanical and dielectric properties of an epoxy resin modified with hydroxyl-terminated polybutadiene. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.08.016>
- Kumar, K. D. & Kothandaraman, B. (2008). Modification of (DGEBA) epoxy resin with maleated depolymerised natural rubber. *Express Polymer Letters*. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2008.36>
- Kusmono, Wildan, M. W. & Mohd Ishak, Z. A. (2013). Preparation and properties of clay-reinforced epoxy nanocomposites. *International Journal of Polymer Science*. <https://doi.org/10.1155/2013/690675>
- Li, Y., Zeng, Z., Peng, K. & Du, H. (2017). Property and morphology study of an epoxy resin modified with ETBN. *ICCM International Conferences on Composite Materials*.
- Liao, Y. H., Marietta-Tondin, O., Liang, Z., Zhang, C. & Wang, B. (2004). Investigation of the dispersion process of SWNTs/SC-15 epoxy resin nanocomposites. *Materials Science and Engineering A*, 385(1-2), 175-181. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.06.031>
- Liu, L. & Wagner, H. D. (2005). Rubbery and glassy epoxy resins reinforced with carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.04.002>
- Mohammad, N. A., Ahmad, S. H., Mohammad, N. E. N. A. & Hassan, N. H. M. (2018). Mechanical properties of epoxy matrix composites toughened by liquid epoxidized natural rubber (LENR). *International Journal of Integrated Engineering*. <https://doi.org/10.30880/ijie.2018.10.08.025>
- Muralishwara, K., Kini, U. A. & Sharma, S. (2019). Epoxy-clay nanocomposite coatings: A review on synthesis and characterization. In *Materials Research Express*. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab1e15>
- Neisiany, R. E., Khorasani, S. N., Lee, J. K. Y., Naeimirad, M. & Ramakrishna, S. (2018). Interfacial toughening of carbon/epoxy composite by incorporating styrene acrylonitrile nanofibers. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.03.006>
- Ngo, T. D., Ton-That, M. T., Hoa, S. V. & Cole, K. C. (2007). Curing kinetics and mechanical properties of epoxy nanocomposites based on different organoclays. *Polymer Engineering and Science*. <https://doi.org/10.1002/pen.20737>
- Okada, A & Usuki, A. (2006). Twenty years of polymer-clay nanocomposites. *Macromolecular Materials and Engineering*. <https://doi.org/10.1002/mame.200600260>
- Ozdemir, N. G., Zhang, T., Aspin, I., Scarpa, F., Hadavinia, H. & Song, Y. (2016). Toughening of carbon fibre reinforced polymer composites with rubber nanoparticles for advanced industrial applications. *Express Polymer Letters*. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2016.37>

- Ozturk, A., Kaynak, C. & Tincer, T. (2001). Effects of liquid rubber modification on the behaviour of epoxy resin. *European Polymer Journal*. [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(01\)00158-6](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(01)00158-6)
- Pereira Soares, V. L., Ramos, V. D., Rangel, G. W. M. & Nascimento, R. S. V. (2002). Hydroxy-terminated polybutadiene toughened epoxy resin: Chemical modification, microstructure, and impact strength. *Advances in Polymer Technology*. <https://doi.org/10.1002/adv.10012>
- Rafiq, A., Merah, N., Boukhili, R. & Al-Qadhi, M. (2017). Impact resistance of hybrid glass fiber reinforced epoxy/nanoclay composite. *Polymer Testing*. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.11.005>
- Ratim, S., Ahmad, S., Bonnia, N. N. & Yahaya, S. M. (2018). Mechanical properties of hybrid SiC/CNT filled toughened epoxy nanocomposite. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/290/1/012005>
- Rodgers, R. M., Mahfuz, H., Rangari, V. K., Chisholm, N. & Jeelani, S. (2005). Infusion of SiC nanoparticles into SC-15 epoxy: An investigation of thermal and mechanical response. *Macromolecular Materials and Engineering*. <https://doi.org/10.1002/mame.200400202>
- Szymańska, J., Bakar, M., Białkowska, A. & Kostrzewska, M. (2018). Study on the adhesive properties of reactive liquid rubber toughened epoxy-clay hybrid nanocomposites. *Journal of Polymer Engineering*. <https://doi.org/10.1515/polyeng-2017-0099>
- Thomas, R., Yumei, D., Yuelong, H., Le, Y., Moldenaers, P., Weimin, Y., Czigany, T. & Thomas, S. (2008). Miscibility, morphology, thermal, and mechanical properties of a DGEBA based epoxy resin toughened with a liquid rubber. *Polymer*. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2007.11.030>
- Utracki, L. A. & Kamal, M. R. (2002). Clay-containing polymeric nanocomposites. In *Arabian Journal for Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1016/c2011-0-07134-x>
- Verchere, D., Pascault, J. P., Sautereau, H., Moschiari, S. M., Riccardi, C. C. & Williams, R. J. J. (1991). Rubber-Modified epoxies. IV. Influence of morphology on mechanical properties. *Journal of Applied Polymer Science*. <https://doi.org/10.1002/app.1991.070430208>
- Vijayan P, P., Puglia, D., Vijayan P, P., Kenny, J. M. & Thomas, S. (2017). The role of clay modifier on cure characteristics and properties of epoxy/clay/carboxyl-terminated poly(butadiene-co-acrylonitrile) (CTBN) hybrid. *Materials Technology*. <https://doi.org/10.1080/10667857.2016.1161946>
- Wang, L., Wang, K., Chen, L., Zhang, Y. & He, C. (2006). Preparation, morphology and thermal/mechanical properties of epoxy/nanoclay composite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.12.020>
- Yazik, M. H. M., Sultan, M. T. H., Mazlan, N., Talib, A. R. A., Naveen, J., Shah, A. U. M. & Safri, S. N. A. (2020). Effect of hybrid multi-walled carbon nanotube and montmorillonite nanoclay content on mechanical properties of shape memory epoxy nanocomposite. *Journal of Materials Research and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.012>
- Yi, H., Hu, M., Yao, D., Lin, H. & Zheng, B. (2020). Tribological and thermomechanical properties of epoxy-matrix nanocomposites containing montmorillonite nanoclay intercalated with polybutadiene-based quaternary ammonium salt. *Plastics, Rubber and Composites*. <https://doi.org/10.1080/14658011.2020.1776921>
- Zhou, L., Du, J. & Yang, R. (2018). Preparation and Flame Retardance of P-Containing Nano-Flameretardant/Polyurethane Elastomer Composite. *Gaofenzi Cailiao Kexue Yu Gongcheng/Polymeric Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.16865/j.cnki.1000-7555.2018.11.019>

Zhou, Y., Pervin, F., Biswas, M. A., Rangari, V. K. & Jeelani, S. (2006). Fabrication and characterization of montmorillonite clay-filled SC-15 epoxy. *Materials Letters*.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.10.042>

Zhou, Y., Pervin, F., Biswas, M., Rangari, V. & Jeelani, S. (2006). Fabrication and characterization of clay/epoxy nanocomposites. *Materials Letters*, 60(7), 869–873.