TUGAS AKHIR – TL184834

TINJAUAN POTENSI NANOPARTIKEL TERHADAP MORFOLOGI DAN SIFAT MEKANIK PADA KOMPOSIT POLIMER EPOKSI

ANDRI FAUZI
NRP. 02511640000129

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Hosta Ardhyananta, S.T., M.Sc.
Amaliya Rasyida S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

TUGAS AKHIR − TL 184834

TINJAUAN POTENSI NANOPARTIKEL TERHADAP MORFOLOGI DAN SIFAT MEKANIK PADA KOMPOSIT POLIMER EPOKSI

ANDRI FAUZI
NRP. 02511640000129

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Hosta Ardhyananta, S.T., M.Sc.
Amaliya Rasyida S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

FINAL PROJECT − TL 184834

A REVIEW OF POTENTIALITY NANOPARTICLES ON MORPHOLOGY AND MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY POLYMER COMPOSITES

ANDRI FAUZI
NRP. 02511640000129

Advisor
Dr. Eng. Hosta Ardhyananta, S.T., M.Sc.
Amaliya Rasyida S.T., M.Sc.

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(*This page is intentionally left blank*)

TINJAUAN POTENSI NANOPARTIKEL TERHADAP MORFOLOGI DAN SIFAT MEKANIK PADA KOMPOSIT POLIMER EPOKSI

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
ANDRI FAUZI
NRP 02511640000129

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Eng. Hosta Ardhyananta, S.T., M.Sc. .....(Pembimbing I)
2. Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc. ....(Pembimbing II)

SURABAYA
Juli 2020

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

TINJAUAN POTENSI NANOPARTIKEL TERHADAP MORFOLOGI DAN SIFAT MEKANIK PADA KOMPOSIT POLIMER EPOKSI

Nama : Andri Fauzi
NRP : 02511640000129
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Pembimbing I : Dr. Eng. Hosta Ardhyananta, S.T., M.Sc.
Pembimbing II : Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc.

Abstrak

Material kuat dan ringan menjadi sangat penting dalam dunia Industri. Material yang kuat dan ringan dapat menurunkan penggunaan bahan bakar dan tingkat emisi oleh mesin seperti halnya pada material komposit polimer epoksi. Epoksi adalah bahan yang digunakan sebagai matriks dalam komposit. Epoksi memiliki sifat mekanik yang baik. Namun, epoksi memiliki keterbatasan dalam aplikasinya. Nanokomposit atau penguatan menggunakan nanopartikel adalah metode untuk meningkatkan sifat mekanik pada komposit polimer epoksi. Partikel cenderung menahan pergerakan fase matriks di sekitarnya. Nanopartikel dengan berbagai macam jenis telah diteliti pengaruhnya terhadap nanokomposit polimer epoksi. Pada tinjauan ini telah dipelajari terkait potensi dan keefektifan jenis partikel Nanosilika, Halloysite, CTBN liquid rubber, Multi-walled carbon nanotubes, dan Montmorillonite nanoclay terhadap morfologi dan sifat mekanik pada komposit polimer epoksi. Didapatkan bahwa jenis nanopartikel yang paling efektif untuk meningkatkan sifat mekanik nanokomposit polimer epoksi pada kekuatan tarik adalah jenis spherical serta jenis nanotubes pada kekuatan tekan dan kekuatan lentur.

Kata Kunci: ***nanokomposit , epoksi, nanopartikel***

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

A REVIEW OF POTENTIALITY NANOPARTICLES ON MORPHOLOGY AND MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY POLYMER COMPOSITES

Student Name : Andri Fauzi
NRP : 02511640000129
Department : Material and Metallurgical Engineering
Advisor 1 : Dr. Eng. Hosta Ardhyananta, S.T., M.Sc.
Advisor 2 : Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc.

Abstract

Strong and lightweight materials have become very important in the industrial world. Strong and lightweight materials can reduce fuel use and emission levels generated by engines as well as epoxy polymer composite materials. Epoxy is a material used as a matrix in composites. Epoxy has good mechanical properties. However, epoxy has limitations in its application. Nanocomposites or particle reinforcement with nanoparticles is a method to improve the mechanical properties of epoxy polymer composites. Nanoparticles tend to restrain the movement of the matrix phase in the vicinity. Its effects on various types of nanoparticles have been investigated for epoxy polymer nanocomposites. This review has been studied the potentiality and effectiveness of Nanosilica, Halloysite, CTBN liquid rubber, Multi-walled carbon nanotubes, and Montmorillonite nano clay particles types on the morphology and mechanical properties of epoxy polymer composites. It was found that the most effective type of nanoparticles to improve the mechanical properties of epoxy polymer nanocomposites in tensile strength are the spherical types as well as the nanotubes types in compressive strength and flexural strength.

Keywords: ***nanocomposites, epoxy, nanoparticles***

(*This page is intentionally left blank*)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis sampaikan kepada Allah SWT atas rahmat dan Hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul "Tinjauan potensi nanopartikel terhadap morfologi dan sifat mekanik pada komposit polimer epoksi". Laporan ini disusun dan diajukan untuk dapat memenuhi sebagian persyaratan studi di Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Penulis juga menyampaikan banyak terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu penulis dari awal pelaksanaan tugas akhir, penentuan topik laporan hingga selesainya penyusunan laporan tugas akhir ini, diantaranya:

1. Allah SWT yang telah memberi kelancaran dalam proses mengerjakan Tugas Akhir hingga penyusunan laporan.
2. Rasulullah SAW yang selalu memberikan kasih sayang dan tuntunannya untuk senantiasa beribadah kepada Allah SWT.
3. Kedua Orang Tua, kakak, dan adik saya yang selalu memberikan dukungan serta do'a yang tidak hentinya untuk penulis.
4. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Ketua Departemen Teknik Material dan Metalurgi.
5. Bapak Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc., selaku dosen wali yang telah membimbing, memberi saran dan arahan serta nasihat dalam segala kegiatan perkuliahan.
6. Bapak Dr. Eng. Hosta Ardhyananta, S.T., M.Sc. selaku pembimbing I tugas akhir yang telah membimbing, memberi banyak dukungan, saran dan arahan serta nasihat dalam pelaksanaan tugas akhir dan penyusunan laporan tugas akhir ini.
7. Ibu Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc. selaku pembimbing II tugas akhir yang telah membimbing, memberi banyak dukungan, saran dan arahan serta nasihat dalam pelaksanaan tugas akhir dan penyusunan laporan tugas akhir ini.

8. Pasangan yang selalu memberikan dukungan serta do'a kepada penulis.
9. Semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung memberikan dukungan dan membantu kelancaran proses tugas akhir ini.

Dalam penyusunan laporan tugas akhir ini, penulis menyadari masih banyak kekurangan dan jauh dari kata sempurna. Dengan kerendahan hati, semua saran dan kritik yang dapat membangun sangat penulis harapkan. Demikian semoga laporan ini dapat memberikan informasi dan bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, 20 Juli 2020
Penulis

Andri Fauzi

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL ..... **i**
LEMBAR PENGESAHAN ..... **v**
ABSTRAK ..... **vii**
ABSTRACT ..... **ix**
KATA PENGANTAR ..... **xi**
DAFTAR ISI ..... **xiii**
DAFTAR GAMBAR ..... **xvii**
DAFTAR TABEL ..... **xix**
BAB I PENDAHULUAN
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Perumusan Masalah 3
1.3 Batasan Masalah 3
1.4 Tujuan *Review* 3
1.5 Manfaat *Review* 4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA
2.1 Material Komposit 5
2.2 Klasifikasi Material Komposit 6
2.3 Nanokomposit 10
2.4 Matriks 14
2.5 Epoksi Resin 16
2.6 Silikon dioksida 20
2.7 Halloysite 23
2.8 Montmorillonite *nanoclay* 25
2.9 *Multi-Walled Carbon Nanotubes* (MWCNT) 28
2.10 CTBN *Liquid rubber* 30
2.11 Manufaktur Komposit 32
2.12 Aplikasi Nanokomposit 35
BAB III METODOLOGI
3.1 Diagram Alir 40
3.2 Material dan Metode Manufaktur 41
3.3 Variabel Pembahasan Jurnal 44
3.4 Pengujian Material 45
3.4.1 SEM (*Scanning Electron Microscope*) 45

3.4.2 Kekuatan Tarik 46
3.4.3 Kekuatan Lentur 47
3.4.4 Kekuatan Tekan 48
3.5 Ruang lingkup pembahasan 48
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN
4.1 Epoksi/Nanosilika 49
4.1.1 Morfologi 51
4.1.2 Kekuatan Tarik 53
4.1.3 Kekuatan Tekan 55
4.1.4 Kekuatan Lentur 56
4.1.5 Analisi Jurnal 57
4.2 Epoksi/Halloysite 58
4.2.1 Morfologi 60
4.2.2 Kekuatan Tarik 62
4.2.3 Kekuatan Tekan 64
4.2.4 Kekuatan Lentur 65
4.2.5 Analisis Jurnal 66
4.3 Epoksi/Montmorillonite *Nanoclay* 68
4.3.1 Morfologi 69
4.3.2 Kekuatan Tarik 71
4.3.3 Kekuatan Tekan 73
4.3.4 Kekuatan Lentur 74
4.3.5 Analisis Jurnal 76
4.4 Epoksi/*Multi-Walled Carbon Nanotubes* (MWCNT) 76
4.4.1 Morfologi 79
4.4.2 Kekuatan Tarik 81
4.4.3 Kekuatan Tekan 83
4.4.4 Kekuatan Lentur 85
4.4.5 Analisis Jurnal 86
4.5 Epoksi/CTBN *Liquid Rubber* 86
4.5.1 Morfologi 88
4.5.2 Kekuatan Tarik 91
4.5.3 Kekuatan Tekan 93
4.5.4 Kekuatan Lentur 94

4.5.5 Analisis Jurnal 96
4.6 Komparasi Morfologi dan Sifat Mekanik Nanokomposit 96
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN
5.1 Kesimpulan 99
5.2 Saran 101
DAFTAR PUSTAKA 103
LAMPIRAN 109
BIODATA PENULIS 119

(*halaman ini sengaja dikosongkan*)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema beragam variasi geometri dispersi serat yang mempengaruhi sifat dari komposit (a) Konsentasi, (b) Ukuran, (c) bentuk, (d) distribusi, dan (e) orientasi 5
Gambar 2.2 Skema klasifikasi untuk berbagai jenis komposit 8
Gambar 2.3 Representasi skematis dari (a) kontinu dan selaras, (b) diskontinyu dan selaras, dan (c) diskontinyu dan serat komposit yang diperkuat secara acak.....9
Gambar 2.4 Skema tiga jenis utama morfologi komposit struktur polimer /lapisan (a) mikrokomposit, (b) interkalasi nanokomposit, dan (c) ekfoliasi nanokomposit. 13
Gambar 2.5 Struktur Kimia Epoksi.....16
Gambar 2.6 Persiapan epiklorohidrin dari propilen dan alil klorida.....18
Gambar 2.7 Pembuatan diglycidyl ether dari bisphenol A.....19
Gambar 2.8 Bisphenol Resin Epoksi Secara umum.....19
Gambar 2.9 Struktur kimia silikon dioksida 20
Gambar 2.10 Diagram fasa partikel silika.....21
Gambar 2.11 Struktur kimia dari Halloysite 24
Gambar 2.12 Formula dan struktur teoritis Montmorillonite nanoclay.....26
Gambar 2.13 Struktur Kimia *Multi-walled carbon nanotubes*.....28
Gambar 2.14 Struktur Kimia CTBN *Liquid rubber* 30
Gambar 3.1 Diagram Alir pembahasan jurnal.....41
Gambar 3.2 Diagram alir proses manufaktur nanokomposit secara umum 44
Gambar 3.3 Mekanisme pengujian SEM 46
Gambar 3.4 Mekanisme pengujian Tarik dan Tekan 47

Gambar 3.5 Mekanisme pengujian lentur (*three point bending*) 47
Gambar 4.1 Hasil Pengujian SEM material nanokomposit yang diperkuat nanosilika (a) tanpa penambahan (b) 1% nanopartikel (c) 2% nanopartikel (d) 3% nanopartikel (e) 4% nanopartikel 51
Gambar 4.2 Hasil Pengujian SEM material nanokomposit yang diperkuat Halloysite (a) tanpa penambahan (b) penambahan 5% (c) penambahan 10%..... 60
Gambar 4.3 Hasil Pengujian SEM material nanokomposit yang diperkuat nanoclay (a) Tanpa penambahan nanopartikel (b) penambahan 2% nanopartikel 70
Gambar 4.4 Hasil Pengujian SEM material nanokomposit yang diperkuat nanoclay (a) Penambahan 4% nanopartikel (b) penambahan 6% nanopartikel (c) penambahan 8% nanopartikel 70
Gambar 4.5 Hasil Pengujian SEM material nanokomposit yang diperkuat MWCNT (a) Tanpa penambahan (b) 0,5% (c) pembesaran tinggi pada 0.5% 79
Gambar 4.6 Hasil Pengujian SEM material nanokomposit yang diperkuat MWCNT (d) 1% (e) pembesaran tinggi pada 1% (f) 1,5%, (g) pembesaran tinggi pada 1.5%..... 80
Gambar 4.7 Hasil Pengujian SEM material nanokomposit yang diperkuat CTBN *Liquid rubber* (a) tanpa penambahan (b) penambahan 5%..... 89
Gambar 4.8 Hasil Pengujian SEM material nanokomposit yang diperkuat CTBN *Liquid rubber* (c) penambahan 10% (d) penambahan 15% (e) penambahan 20% (f) Penambahan 25%..... 89

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik nanopartikel terhadap polimer 11
Tabel 2.2 Sifat fisik, mekanik, termal dan listrik kuarsa dan material silika.....21
Tabel 2.3 Sifat material halloysite 24
Tabel 2.4 Fraksi oksida dari montmorillonite *nanoclay*.....26
Tabel 2.5 Sifat fisik dari material montmorillonite *nanoclay* 27
Tabel 2.6 Sifat dari material *Multi-walled carbon nanotubes*.....29
Tabel 2.7 Sifat material CTBN.....31
Tabel 2.8 Standarisasi penggunaan resin epoksi gel coat dan laminat pada kapal laut (Biro Klasifikasi Indonesia, 2014) 35
Tabel 2.9 Standarisasi penggunaan resin epoksi gelcoat pada pipa polimer (Lloyd's Register Group, 2018).....35
Tabel 2.10 Standarisasi penggunaan resin epoksi laminat pada pipa polimer (Lloyd's Register Group, 2018).....36
Tabel 3.1 Material dan metode manufaktur.....42
Tabel 3.2 Ruang lingkup pembahasan.....48
Tabel 4.1 Sifat tarik nanokomposit epoksi/nanosilika.....53
Tabel 4.2 Sifat tekan nanokomposit epoksi/nanosilika 55
Tabel 4.3 Sifat lentur nanokomposit epoksi/nanosilika.....56
Tabel 4.4 Sifat Tarik nanokomposit epoksi/halloysite 62
Tabel 4.5 Sifat Tekan nanokomposit epoksi/halloysite.....64
Tabel 4.6 Sifat Lentur nanokomposit epoksi/halloysite 65
Tabel 4.7 Sifat tarik nanokomposit epoksi/montmorillonite nanoclay 72
Tabel 4.8 Sifat Tekan nanokomposit epoksi/montmorillonite nanoclay 74
Tabel 4.9 Sifat Lentur nanokomposit epoksi/montmorillonite nanoclay 75

Tabel 4.10 Sifat tarik nanokomposit epoksi/MWCNT 82
Tabel 4.11 Sifat Tekan nanokomposit epoksi/MWCNT 84
Tabel 4.12 Sifat Lentur nanokomposit epoksi/MWCNT..... 85
Tabel 4.13 Sifat Tarik nanokomposit epoksi/ CTBN *liquid rubber* 91
Tabel 4.14 *Elongation break* nanokomposit epoksi/ CTBN *liquid rubber* 92
Tabel 4.15 Sifat Impak nanokomposit epoksi/ CTBN *liquid rubber* 92
Tabel 4.16 Sifat Tekan nanokomposit epoksi/CTBN *Liquid rubber* 94
Tabel 4.17 Sifat Lentur nanokomposit epoksi/CTBN *Liquid rubber* 95
Tabel 4.18 Komparasi sifat morfologi nanokomposit 97
Tabel 4.19 Komparasi sifat mekanik nanokomposit..... 98

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dunia Industri telah berkembang sangat pesat dalam beberapa dekade ini. Hal tersebut menuntut industri berlomba-lomba dalam menciptakan material yang lebih unggul dibandingkan material terdahulunya. Material yang kuat dan ringan seperti halnya komposit sangat penting dalam menurunkan tingkat emisi yang dihasilkan oleh mesin karena dapat mengurangi penggunaan bahan bakar. Oleh karena itu, Permasalahan yang sering terjadi pada material kuat dan ringan patut diberikan perhatian lebih. Terkhusus dalam ilmu rekayasa material komposit yang digunakan dalam dunia industri yang dapat menunjang penggunaan yang lebih baik kedepannya. Berbagai Penelitian telah dilakukan untuk dapat mengembangkan kemampuan material pada kondisi tertentu yang diinginkan dengan melakukan variasi pada material maupun *filler* pada komposit yang membutuhkan kekuatan material yang baik agar dapat menahan beban yang diterima. Kegagalan pada material menjadi ancaman berkelanjutan terhadap generasi baru material kuat dan ringan dengan persentase signifikan dari strukturnya yang terbuat dari komposit dan terpapar pada dampak eksternal. Hal ini menjadi perhatian utama karena ketahanan material komposit yang dapat mempertahankan tingkat deformasi yang tinggi tanpa menyebabkan retakan, meskipun sub-struktur internal rusak (De Francisci dan Chen, 2012).

Komposit sebagai material masa depan adalah material yang terdiri atas matriks dan *filler*. *Filler* pada komposit memberikan efek dominan terhadap kekuatan dan kekakuan. *Filler* pada komposit dapat berjumlah satu atau lebih. Salah satu jenis *filler* yang paling umum digunakan dalam komposit adalah nanopartikel karena memberikan keunggulan terhadap sifat mekanik seperti kekuatan tekan dan lentur yang sangat baik, ketahanan terhadap listrik dan bahan kimia yang baik, serta memiliki sifat tahan api. Sedangkan matriks akan berperan mengelilingi fasa penguat pada

komposit dan melindungi dari pengaruh lingkungan secara langsung (Callister, 2006). Matriks pada material komposit adalah material yang memiliki kemampuan penyerapan energi paling besar pada susunannya. Oleh karena itu, pengembangan terhadap kemampuan penyerapan energi pada matriks sangat diperlukan. Epoksi menjadi pilihan material sebagai matriks pada komposit karena kemudahannya serta memiliki sifat material yang baik terutama pada kekuatan mekanik, ketahanan lelah, dan kecocokannya terhadap berbagai macam *filler* dalam material komposit berpenguat nanopartikel. Epoksi dapat dimodifikasi pada struktur dan komposisinya sehingga didapatkan sifat yang diinginkan. Namun, epoksi sebagai matriks masih memiliki keterbatasan pada penggunaannya dalam material komposit berpenguat nanopartikel.

Nanokomposit atau penguatan dengan menggunakan nanopartikel merupakan salah satu metode yang dapat meningkatkan sifat ketahanan termal dan sifat mekanik pada komposit karena cenderung dapat menahan pergerakan fase matriks di sekitar masing-masing partikel (Callister, 2006). Nanopartikel dengan berbagai macam jenis telah cukup banyak diteliti pengaruhnya terhadap morfologi dan sifat mekanik material komposit polimer epoksi. Peningkatan sifat mekanik pada komposit dapat terjadi secara signifikan dengan penambahan berbagai jenis nanopartikel pada kadar yang tepat. Oleh karena itu, tinjuan ini akan membahas terkait potensi dan keoptimalan jenis dan bentuk nanopartikel (*spherical*, *platelets*, *nanotubes*, dan *soft*) yang digunakan sebagai *filler* pada polimer epoksi yaitu nanosilika, halloysite, montmorillonite *nanoclay*, *multi-walled carbon nanotubes*, dan CTBN *liquid rubber* terhadap morfologi dan sifat mekanik nanokomposit.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah yang terdapat dalam *Review* ini antara lain :

1. Bagaimana pengaruh jenis nanopartikel yang digunakan terhadap morfologi komposit polimer epoksi?
2. Bagaimana pengaruh jenis nanopartikel yang digunakan terhadap sifat mekanik komposit polimer epoksi?
3. Bagaimana menentukan jenis dan bentuk nanopartikel (*spherical*, *platelets*, *nanotubes*, dan *soft*) dengan potensi dan kepotimalan yang lebih baik pada nanokomposit polimer epoksi?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan pada *Review* ini antara lain:

1. *Review* ini tidak membahas perbedaan proses manufaktur terhadap sifat dari material nanokomposit polimer epoksi.
2. *Review* ini tidak membahas perbedaan proses sintesis nanopartikel terhadap sifat dari material nanokomposit polimer epoksi.
3. *Review* ini tidak membahas pengaruh kondisi lingkungan terhadap sifat mekanik nanokomposit polimer epoksi.

1.4 Tujuan *Review*

Tujuan dari *Review* ini antara lain:

1. Menganalisis pengaruh jenis nanopartikel yang digunakan terhadap morfologi komposit polimer epoksi.
2. Menganalisis pengaruh jenis nanopartikel yang digunakan terhadap sifat mekanik komposit polimer epoksi.
3. Menganalisis jenis dan bentuk nanopartikel (*spherical*, *platelets*, *nanotubes*, dan *soft*) dengan potensi dan keoptimalan yang lebih baik pada nanokomposit polimer epoksi.

1.5 Manfaat *Review*

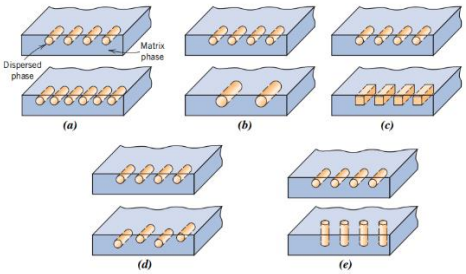
Review yang dilakukan diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Diperoleh suatu tinjauan jenis material nanokomposit ringan dan kuat yang dapat digunakan sebagai material masa depan yang memiliki sifat mekanik yang lebih baik.
2. Dapat digunakan sebagai rujukan terhadap penelitian-penelitian yang berkaitan dengan pengembangan material nanokomposit polimer epoksi dalam dunia industri.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Material Komposit

Semakin berkembangnya material dengan penggunaan-penggunaan tertentu maka, semakin banyak teknologi modern yang membutuhkan bahan dengan kombinasi sifat yang tidak biasa yang tidak dapat dipenuhi oleh paduan logam konvensional, keramik, dan bahan polimer. Terkhusus pada material luar angkasa, bawah air, dan transportasi. Material Komposit yang merupakan kombinasi dari dua atau lebih jenis material dengan karakteristik berbeda. Kombinasi dan rentang sifat material telah, dan sedang, diperluas oleh pengembangan material komposit. Secara umum, komposit dianggap sebagai bahan multifase yang menunjukkan proporsi signifikan dari sifat-sifat kedua fase konstituen sehingga kombinasi sifat yang lebih baik terwujud. Kombinasi yang baik dapat dibentuk dengan memperhatikan karakteristik material penyusun dengan bijaksana. Material komposit juga terjadi di alam, seperti halnya kayu. Kayu terdiri dari serat selulosa yang kuat dan fleksibel yang dikelilingi dan disatukan oleh bahan kaku yang disebut lignin. Selain itu, tulang adalah gabungan dari kolagen protein yang kuat namun lunak dan apatit mineral yang keras dan rapuh (Callister, 2006).



Gambar 2.1 Skema beragam variasi geometri dispersi serat yang mempengaruhi sifat dari komposit (a) Konsentasi, (b) Ukuran, (c) bentuk, (d) distribusi, dan (e) orientasi (Callister, 2006)

Komposit saat ini dapat didefinisikan sebagai material multifase yang dibuat secara artifisial, berbeda dengan material yang muncul atau terbentuk secara alami. Selain itu, fase konstituen harus secara kimiawi berbeda dan dipisahkan oleh antarmuka yang berbeda. Sehingga, sebagian besar paduan logam dan banyak keramik tidak sesuai dengan definisi ini karena beberapa fase mereka terbentuk sebagai konsekuensi dari fenomena alam. Kebanyakan komposit telah dibuat untuk meningkatkan kombinasi karakteristik mekanik seperti kekakuan, ketangguhan, dan ketahanan suhu tinggi. Pada banyak material komposit biasanya terdiri dari dua fase yaitu matriks yang kontinu dan mengelilingi fase lainnya, sering disebut fase terdispersi. Lalu penguat (*Reinforcement*) dengan berbagai jenis penguat yang dapat di kombinasikan pada komposit Satu skema sederhana untuk klasifikasi bahan komposit ditunjukkan pada Gambar 2.1, yang terdiri dari tiga bagian utama yaitu partikel-diperkuat, serat-diperkuat, dan komposit struktural serta ada dua sub bagian untuk masing-masing. Fasa terdispersi untuk komposit yang diperkuat-partikel adalah sama (yaitu, dimensi partikel kira-kira sama di semua arah), untuk komposit yang diperkuat serat, fase terdispersi memiliki geometri serat (yaitu, rasio Panjang-diameter yang besar). Komposit struktural adalah kombinasi dari komposit dan bahan homogen (Callister, 2006).

2.2 Klasifikasi Material Komposit

Berdasarkan terbentuknya komposit dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis yaitu:

a. Komposit Alam: komposit yang terbentuk secara alami seperti Kayu, Tulang, Bambu, Nanas, dsb.
b. Komposit Buatan: yaitu komposit yang terbentuk melalui sintesis material seperti *Glass fiber reinforced plastic* (GFRP), *Metal Matrix Composite* (MMC), *Ceramic Matrix Composite* (CMC), dsb.

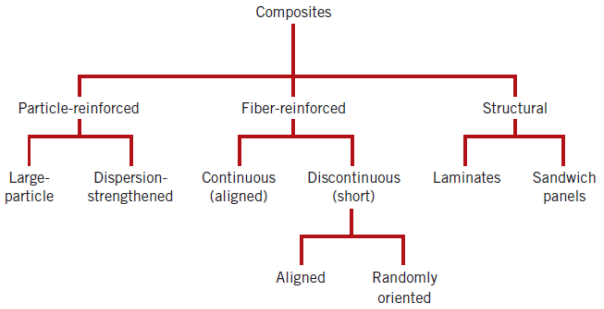
Berdasarkan jenis matriks yang digunakan pada material maka, komposit dapat dikelompokkan menjadi tiga jenis yaitu:

a. *Metal-matrix composite* (MMC)
Komposit jenis ini menggunakan logam ulet sebagai matriks dalam susunannya. Penggabungan logam dengan material penguatnya dapat meningkatkan temperatur operasinya. Jika dibandingkan dengan kemampuan matriksnya, biasanya komposit jenis ini mengalami peningkatan kekakuan spesifik, kekuatan spesifik, ketahanan abrasi, *creep*, konduktifitas termal, dan lain lain. Beberapa material komposit jenis ini cukup reaktif terhadap temperatur tinggi. Hal ini dapat menyebabkan degradasi pada komposit. Oleh karena itu, pada MMC biasanya diterapkan *protection surface coating* pada penguat dan melakukan modifisikasi pada paduan matriks

b. *Ceramic-matrix composite* (CMC)
Komposit jenis ini memodifikasi keramik menjadi komposit didasarkan oleh ketahan oksidasi dan deteriotasi pada temperatur tinggi. Namun, rendahnya ketangguhan dari keramik jika dibandingkan dengan material lain menjadi kelemahan terbesar dari keramik. Oleh karena itu, keramik diberikan *filler* didalamnya untuk meningkatkan ketahanan *fracture*. Biasanya, komposit keramik memliki penguat dengan jenis partikel dispersi. Hal ini disebabkan karena interaksi antara *crack initiation* dan partikel dispersi mampu menahan retakan pada matriks.

c. *Polymer-matrix Composite* (PMC) atau *Organic-Matrix Composite* (OMC)
Komposit ini menggunakan material polimer sebagai fasa matriks, dan penguat yang biasa digunakan dalam bentuk serat. Jenis komposit ini adalah yang paling umum diproduksi secara luas jika dibandingkan dengan dua jenis komposit sebelumnya. Hal ini dikarenakan komposit jenis ini dapat dengan mudah untuk diproduksi, sifat pada temperatur ruangan yang cukup baik, dan biaya produksi yang cukup murah. Umumnya, penggunaan polimer sebagai matriks harus ditentukan temperatur aplikasinya, karena

polimer umumnya mengalami pelunakan, meleleh, dan degradasi pada temperatur yang lebih rendah dibandingkan penguatnya. Umumnya polimer yang digunakan adalah jenis Poliester dan vinil ester karena biaya produksi yang paling murah. Namun untuk aplikasi yang membutuhkan kemampuan lebih seperti pada bidang otomotif, Epoksi adalah jenis polimer yang lebih cocok digunakan karena memiliki sifat mekanik dan ketahanan terhadap penyerapan air yang lebih baik (Callister, 2006).

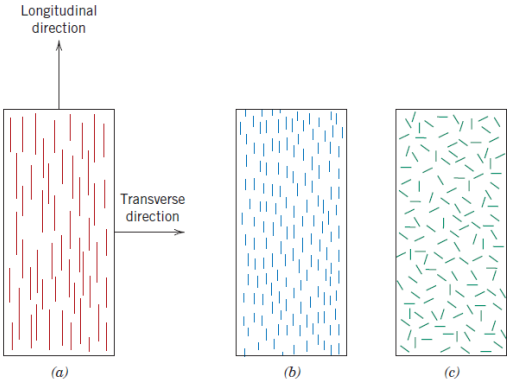


Gambar 2.2 Skema klasifikasi untuk berbagai jenis komposit (Callister, 2006)

Berdasarkan struktur penguatnya komposit dibedakan menjadi 3 jenis yaitu:

a. komposit partikel (*Particulate Composite Materials*) merupakan jenis komposit yang menggunakan partikel/butiran sebagai *filler* (pengisi) pada matriksnya. Partikel dapat berupa logam atau non logam dapat digunakan sebagai *filler*.
b. komposit serat (*Fibrous Composite Materials*) terdiri dari dua komponen penyusun yaitu matriks dan serat.
c. komposit Struktural (*Structural Composite Materials*) terdiri dari sekurang-kurangnya dua material berbeda yang direkatkan bersama-sama. Proses pelapisan dilakukan

dengan mengkombinasikan aspek terbaik dari masing-masing lapisan untuk memperoleh bahan yang diinginkan.



Gambar 2.3 Representasi skematis dari (a) kontinu dan selaras, (b) diskontinyu dan selaras, dan (c) diskontinyu dan serat komposit yang diperkuat secara acak (Callister, 2006).

Berdasarkan jenis *filler* serat komposit dapat diklasifikasikan menjadi empat jenis komposit yaitu:

a. *Continuous Fibre Composite,* Tipe ini mempunyai susunan serat panjang dan lurus, membentuk lamina diantara matriksnya. Tipe ini mempunyai kelemahan pemisahan antar lapisan.
b. *Woven Fibre Composite* (*bi-directional*) adalah komposit yang tidak mudah dipengaruhi pemisahan antar lapisan karena susunan seratnya mengikat antar
c. Lapisan, Susunan serat memanjangnya yang tidak begitu lurus mengakibatkan kekuatan dan kekakuan melemah.
d. *Discontinous Fibre Composite* adalah tipe komposit dengan serat pendek. Tipe ini dibedakan lagi menjadi 3:
   - *Aligned discontinuous fiber*
   - *Off-axis aligned discontinuous fiber*
   - *Randomly oriented discontinuous fiber* (Gibson, 1994).

2.3 Nanokomposit

Nanokomposit telah menarik perhatian lebih para peneliti di dunia pada abad ke-21 karena berbagai keunggulan yang ditawarkan. Nanokomposit tergolong kedalam material jenis baru dan sedang dikembangkan yang dimana *filler* berupa material nano, seperti halnya nano partikel, nano fiber, dsb. *Nanofiller* yang paling umum digunakan pada nanokomposit adalah *natural clay* (*mined, refined and treated*), *synthetic clay*, nanosilika, nanokeramik, nano kalsium karbonat, dan *nanotubes* (*carbon-based*). Sifat-sifat yang diberikan oleh nanopartikel terhadap matriks polimer luar biasa. Peningkatan *properties* telah memungkinkan bahan ini untuk dapat bersaing secara komersial dengan bahan-bahan tradisional. Beberapa keunggulan nanokomposit diantaranya adalah Penguatan yang efisien dengan penurunan minimal terhadap ketangguhan dan kekuatan impak, daya tahan termal, ketahanan api, peningkatan sifat penghalang cairan dan gas, ketahanan abrasi, berkurangnya penyusutan, kehilangan *residual*, sifat listrik, elektronik, dan optic yang baik (Bhattacharya, dkk 2008).

Metode mempersiapkan nanokomposit secara umum terbagi menjadi tiga macam yaitu *Solution casting*, *melt blending*, dan in-situ *polymerization*. Dalam proses *Solution casting* polimer, pelarut, dan penguat nano dikombinasikan dan dicampur menyeluruh dengan metode ultrasonikasi yang kemudian pelarut dibiarkan menguap meninggalkan nanokomposit sebagai film tipis. Pelarut yang digunakan harus sepenuhnya dapat melarutkan polimer dengan baik agar nanopartikel terdispersi kedalamnya. Pelarut yang digunakan akan membantu mobilitas rantai polimer dalam interkalasi rantai polimer dengan penguat nano. Pada metode *melt blending* digunakan *extruder* atau *mechanical mixer* dalam prosesnya. Polimer dan penguat nano dimasukkan kedalam *extruder* lalu mengalami pencampuran secara intensif selama beberapa waktu. Dalam metode ini, mobilitas polimer hanya berasal dari energi panas. Pada metode in-situ *polymerization*, monomer dan penguat nano dicampurkan. Monomer diselingi

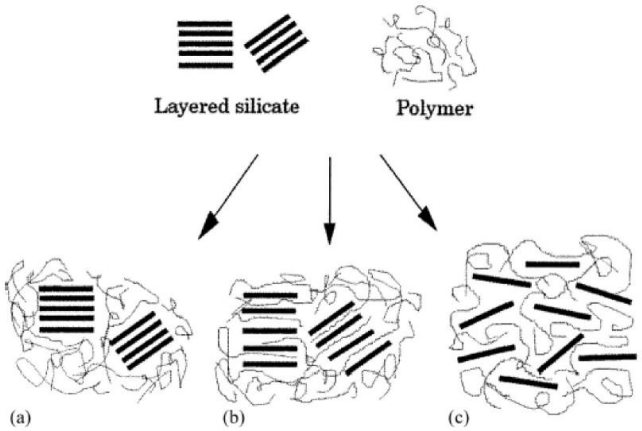
antara lapisan silikat. Monomer yang telah diselingi kemudian dipolimerisasi. Polimerisasi dapat disebabkan oleh beberapa modifikasi permukaan pada permukaan silikat atau karena adanya fungsi yang mengkatalisasi reaksi (Anandhan dan Bandyopadhyay, 2011). Pengaruh nanopartikel pada komposit dijelaskan leih rinci pada Tabel 2.1 (Koo, 2006)

Tabel 2.1 Karakteristik nanopartikel terhadap polimer (Koo, 2006)

No	Properties yang ditingkatkan	Kekurangan
1	Sifat mekanik (Tarik, kekakuan, ketangguhan)	Peningkatan viskositas (keterbatasan proses)
2	Gass barrier	Kesulitan dispersi
3	Aditif sinergis tahan api	Masalah Optik
4	Stabilitas dimensi	Pengendapan
5	Ekspansi termal	Warna hitam ketika nanopartikel yang mengandung karbon berbeda digunakan
6	Konduktivitas termal Resistensi ablasi Resistensi Kimia Reinforcement	

Beberapa fenomena dapat terjadi dalam proses manufaktur nanokomposit terutama pada morfologi dari nanokomposit yang diantaranya adalah terjadinya peristiwa *exfoliated* dan *intercalated*. Hal ini sangat tergantung pada tingkat kemampuan dispersi dari masing masing nanopartikel. *Exfoliated* pada nanokomposit dapat dibagi menjadi dua yaitu *ordered* dan *disordered exfoliated.* Suatu keadaan morfologi antara *exfoliated* dan *intercalated* disebut juga sebagai *partial exfoliated*. Perbedaan tersebut menyebabkan

terjadinya variasi yang signifikan terhadap sifat mekanik dari nanokomposit polimer. *Exfoliated* telah menjadi tujuan utama dari sebagian besar peneliti di bidang nanokomposit karena morfologi ini diharapkan dapat mengarah pada peningkatan signifikan dalam sifat nanokomposit, dengan kadar *filler* nanopartikel yang jauh lebih rendah daripada komposit tradisional. Dalam kasus *ordered exfoliated*, *nano-layer* yang tersusun dan paralel dipertahankan serta morfologi yang homogen terdapat di seluruh matriks. Dalam kasus *disordered exfoliated*, susunan *nano-layer* sepenuhnya terganggu dan *nano-layer* bersifat homogen dan tersebar secara acak dalam polimer. Sedangkan, pada *partially exfoliated* terjadi dengan sedikit tumpukan kecil *intercalated layer*. *Intercalated nanocomposites* terbentuk ketika beberapa rantai polimer masuk di antara *interlayer* d-*spacing* dari partikel dan diperluas hingga batas tertentu. *Intercalated* dibagi menjadi dua yaitu *ordered* dan *disordered intercalated* dengan ciri yang sama seperti *exfoliated.* namun, tergantung pada perubahan relatif dalam jarak lapisan dan orientasi. Secara umum *intercalated* menciptakan jarak antar nanopartikel yang tersebar didalam polimer atau tersebar perbagian. *Intercalated* juga memungkinan terbentuknya aglomerasi atau cluster dari nanopartikel sehingga dapat menurunkan sifat dari nanokomposit. Skema dari tiga jenis utama morfologi komposit dengan struktur polimer/lapisan dijelaskan pada Gambar 2.4 (Liu dkk, 2006).



Gambar 2.4 Skema tiga jenis utama morfologi komposit struktur polimer /lapisan (a) mikrokomposit, (b) interkalasi nanokomposit, dan (c) ekfoliasi nanokomposit. (Liu dkk, 2006)

Sifat mekanik nanokomposit dengan keunggulannya telah menghasilkan minat besar dalam berbagai aplikasi otomotif dan umum/industri. Potensi untuk dapat digunakan sebagai *mirror housing* pada berbagai jenis kendaraan, gagang pintu, penutup mesin, dan penutup sabuk. Aplikasi yang lebih umum seperti pengemasan, sel bahan bakar, sel surya, tangki bahan bakar, wadah plastik, *impeler* dan pisau untuk penyedot debu, perkakas listrik perumahan, dan penutup untuk peralatan elektronik portabel seperti ponsel dan pager. Aplikasi nanokomposit lainnya adalah pada penghalang gas untuk botol plastik, kemasan, dan barang olahraga, *energy storage systems and sensors*, kaca dan membran optik, Produk dengan sifat mudah terbakar rendah, Sektor elektronik dan otomotif, pelapisan, dsb (Anandhan dan Bandyopadhyay, 2011). Nanokomposit epoksi telah menarik banyak minat dalam bidang penelitian nanokomposit dalam beberapa tahun terakhir. Seperti contoh, Penambahan Montmorillonite nanoclay memiliki potensi kemanfaatan yaitu,

peningkatan modulus, kekuatan, ketangguhan patah, ketahanan benturan, penghalang gas dan cairan, dan peningkatan flame retardance (Bhattacharya, dkk 2008).

2.4 Matriks

Menurut Gibson, (1994) matriks dalam struktur komposit bisa berasal dari bahan polimer, logam, maupun keramik. Matriks secara umum berfungsi untuk mengikat serat menjadi satu struktur komposit. Matriks bersifat lebih *ductile* namun mempunyai kekuatan yang lebih rendah. Matriks juga memiliki fungsi yang penting terhadap performa komposit. Beberapa fungsi dari matriks adalah:

1. Matriks sangat berperan penting dalam mengikat serat menjadi satu kesatuan, menahan serat untuk tetap sejajar dalam menahan tekanan dari arah tertentu. Beban yang diterima pada matriks akan disalurkan kepada serat sehingga membuat komposit bertahan dari tekanan kompresi, gaya geser, dan bahkan beban tarik. Matriks dengan penguat serat pendek mampu menahan beban tergantung dari kemampuan matriks sebagai media transfer-beban, dan efisiensi dari transfer-beban secara langsung berhubungan dengan kualitas ikatan serat/matriks.
2. Matriks berfungsi mengisolasi antar serat sehingga serat menjadi entitas yang terpisah satu sama lain.
3. Matriks berfungsi melindungi filamen serat dari kerusakan mekanik (contohnya abrasi) dan dari serangan lingkungan. Namun banyak jenis resin yang digunakan sebagai matriks untuk serat kaca masih dapat terjadi difusi air, sehingga terkadang fungsi ini tidak terpenuhi dan akibatnya terjadi kerusakan yang disebabkan oleh lingkungan untuk mengatasi permasalahan ini. Untuk MMC atau CMC yang bekerja di temperatur yang tidak stabil, matriks diperlukan untuk melindungi serat dari gangguan oksidasi.
4. Matriks yang ulet akan berfungsi untuk memperlambat atau menghentikan *crack* yang disebabkan kerusakan serat,

sedangkan matriks yang *brittle* bergantung kepada seratnya yang berfungsi sebagai penghambat *crack* pada matriks.

5. Ditinjau dari kualitas "pegangan" pada serat (kekuatan ikatan antar-muka), matriks juga dapat menjadi faktor penting untuk meningkatkan ketangguhan komposit.

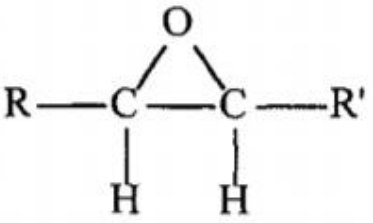
Komposit matriks polimer terdiri dari resin polimer sebagai matriks, dengan serat sebagai media penguat. Komposit jenis ini adalah komposit yg paling umum di aplikasikan dalam jumlah terbesar, mengingat sifat temperatur kamar, kemudahan fabrikasi, dan biaya operasional yang murah. Matriks sering menjadi penentu ketahanan temperatur maksimum yang dapat diterima oleh komposit karena matriks melunak, meleleh, atau terdegredasi pada temperatur yang jauh lebih rendah dari penguat serat. Resin polimer yang paling banyak digunakan dan paling murah adalah poliester dan ester vinil. bahan matriks ini digunakan terutama untuk komposit yang diperkuat serat gelas Sejumlah besar formulasi resin memberikan berbagai sifat untuk polimer ini Sedangkan resin epoksi yang lebih mahal lebih sering digunakan secara luas pada aplikasi luar angkasa karena memiliki sifat mekanik yang lebih baik dan tahan terhadap kelembaban daripada poliester dan resin vinil (Callister, 2006).

Terdapat 2 klasifikasi matriks polymer berdasarkan pembentukannya yaitu:

1. *Thermosetting Polymer*:
   - *Polymer thermoset* yang paling banyak digunakan adalah epoksi, *unsaturated polyester*, dan *vinyl ester*.
   - Resin cair berubah menjadi *solid* yang keras disebabkan oleh reaksi *cross-linking*.
   - Sifat mekanik tergantung dari unit molekul, panjang, dan densitas dari *cross-linking*.
2. *Thermoplastic Polymer*:
   - Tidak ada *cross-linking*
   - Kekuatan dan kekakuan berasal dari sifat bawaan monomer dan berat molekulnya

2.5 Epoksi Resin

Epoksi resin ditemukan pada tahun 1909 oleh Prileschajew. Epoksi didefinisikan sebagai pra-polimer berbobot molekul rendah yang mengandung lebih dari satu gugus epoksida. Epoksi termasuk resin jenis *termoseting* dengan properti resin yang bergantung pada kombinasi spesifik dari komponen penyusun epoksi. Sejauh ini yang paling signifikan secara komersial dari resin-resin ini adalah resin yang diperoleh dengan glikoksidasi bisphenol A dengan epichlorohydrin seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 (Massingil dan Bauer, 2000).



Gambar 2.5 Struktur Kimia Epoksi
(Massingil dan Bauer, 2000)

Epoksi resin dalam proses *curing*-nya menggunakan bebrapa tipe *hardener*. Beberapa agen *hardener* yang paling umum dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Poliamina dan turunan alifatik.
   Poliamina dan turunan alifatik mengandung bahan-bahan seperti etilena diamina, dietilena tririamina, trietilene tetramin, tetraetilene pentamin, dan beberapa amina sikloalifatik. *Curing* agen ini tergolong dalam kelas viskositas rendah dan dapat *curing* pada temperatur ruang. Amina yang tidak dimodifikasi menghadirkan bahaya penanganan tertentu karena sifat kebasaannya yang tinggi dan tekanan uap yang relatif tinggi. Turunan yang kurang berbahaya dari amina alifatik diperoleh dari reaksi asam lemak dengan berat molekul yang tinggi dengan amina

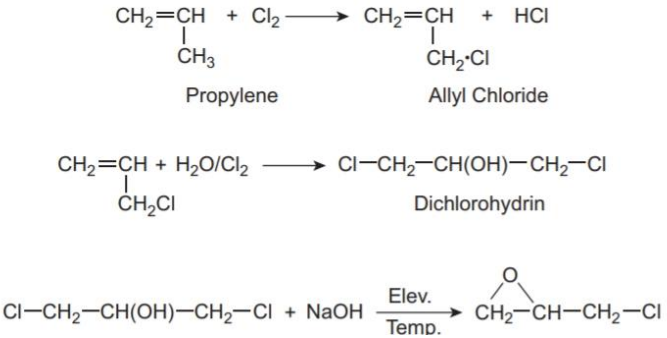
alifatik. Selain memiliki tekanan uap yang lebih rendah, "poliamida reaktif" dan sistem amidoamin ini akan membuat resin epoksi *curing* pada suhu kamar untuk menghasilkan produk yang lebih keras dan lebih fleksibel.

2. Poliamina alifatik yang dimodifikasi.
   Bahan ini adalah *curing agent* pada temperatur ruang yang dibentuk dengan mereaksikan amina alifatik berlebih dengan bahan yang mengandung epoksi untuk meningkatkan berat molekul amina dan mengurangi tekanan uapnya. Sifat-sifat kinerja dari sistem *curing* adisi amina tidak berbeda secara signifikan dengan poliamina alifatik.
3. Amina *aromatic*.
   Bahan ini mengandung bahan-bahan seperti 4,4'-methylenedianiline, m-phenylenediamine, dan 4,4'-diamino-diphenyl sulfone. Amina aromatik kurang reaktif dibandingkan amina alifatik dan biasanya membutuhkan suhu *curing* mencapai 300 °F.
4. Anhidrida asam.
   Bahan ini adalah bahan *curing* kedua yang paling sering digunakan setelah poliamina. Secara umum, anhidrida asam membutuhkan proses *curing* pada suhu tinggi tetapi menawarkan keuntungan umur pot yang lebih lama dan sifat listrik yang lebih baik daripada amina aromatik.
5. Asam karboksilat.
   Zat pengikat silang formaldehida bebas dan tanpa VOC untuk resin epoksi air berbasis asam karboksilat. Oligomer/polimer fungsional asam dapat melakukan *curing* dengan resin epoksi dan bereaksi dengan cabang gugus hidroksil untuk membentuk ester. Resin asam karboksilat aromatik berbasis asam trimelitat *curing* pada 150 ° C tanpa katalis tambahan.
6. Asam lewis dan bahan pengawet tipe basa.
   Proses curing dengan asam lewis dan agen *curing* jenis basa diproses oleh homopolimerisasi gugus epoksi yang diinisiasi oleh asam dan basa Lewis. *Curing agent* ini dapat

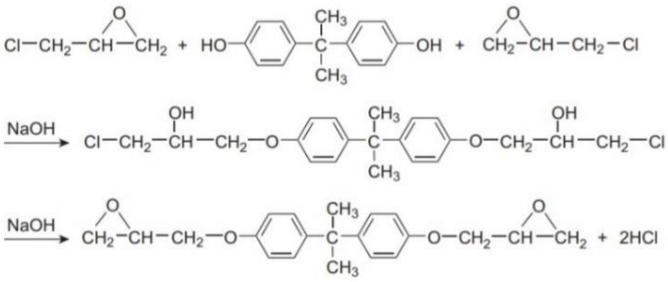
memberikan masa pakai suhu ruang yang lama dengan *curing* cepat pada suhu tinggi, dan dengan demikian menghasilkan produk dengan sifat listrik dan fisik yang baik pada suhu yang relatif tinggi (150-170 °C).

7. Resin aminoplast dan fenoplast.
   Kelas ini mewakili berbagai resin melamin, fenol, dan urea-formaldehida yang terikat silang melalui kombinasi reaksi melalui gugus hidroksil dari resin epoksi, kondensasi sendiri, dan reaksi melalui gugus epoksida. Sistem ini *curing* pada suhu yang relatif tinggi (325 – 400 °F) dan menghasilkan produk akhir dengan ketahanan kimia yang sangat baik.
8. Resin epoksi fenolik yang dibatasi.
   Resin aril eter yang dibatasi fenolik dapat dibuat dengan ujung *capping* resin epoksi dengan bisphenol A (Massingil dan Bauer, 2000).

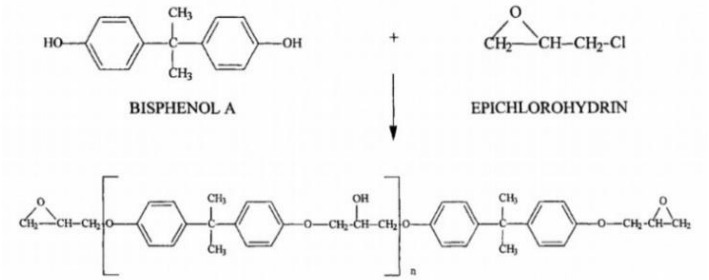
Proses sintesis dari resin polimer epoksi dijelaskan lebih terperinci pada Gambar 2.6, 2.7, dan 2.8.



Gambar 2.6 Persiapan epiklorohidrin dari propilen dan alil klorida
(Massingil dan Bauer, 2000)



Gambar 2.7 Pembuatan diglycidyl ether dari bisphenol A (Massingil dan Bauer, 2000)



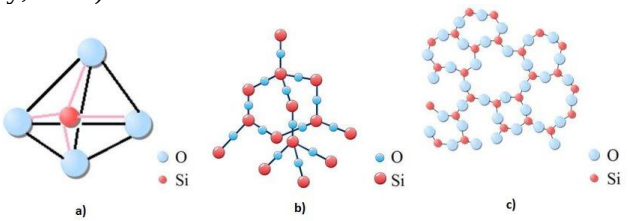
Gambar 2.8 Bisphenol Resin Epoksi Secara umum (Massingil dan Bauer, 2000)

Epoksi dipilih sebagai resin dalam komposit karena sifat mekaniknya yang sangat baik, daya rekat yang tinggi pada banyak bidang, ketahanan panas dan kimia yang baik. Resin epoksi telah banyak digunakan untuk aplikasi perekat struktural dalam industri dirgantara karena sifat perekatnya yang tinggi dan biaya yang rendah. Resin epoksi yang diperkuat dengan nanopartikel atapun serat berkekuatan tinggi memiliki potensi terbesar untuk digunakan dalam banyak industri. Penguat dengan kekuatan dan modulus tinggi dapat dimasukkan ke dalam berbagai bahan matriks. Resin epoksi yang biasa digunakan dalam aplikasi adalah resin epoksi dua komponen yang dimana resin epoksi dengan dua komponen akan *curing* lebih mudah pada kondisi ruang dan tidak

membutuhkan perlakukan tambahan. Resin epoksi dua komponen memiliki ketahanan kimia yang baik. Epoksi memiliki rentang densitas dari 1,1 – 1,4 gr/cm^3 yang menyebabkan resin epoksi memiliki fleksibilitas yang baik (Massingil dan Bauer, 2000). Selain fitur fleksibilitas, Resin polimer epoksi telah ditinjau oleh banyak peneliti terhadap sifat yang ditawarkan dengan kondisi *curing* yang benar memiliki keunggulan lain seperti ketahanan kimia yang sangat baik, terutama terhadap lingkungan alkali, Daya rekat luar biasa ke berbagai media, Kekuatan tarik, tekan, dan lentur yang sangat tinggi, Rendahnya penyusutan pada saat *curing*, Sifat insulasi listrik yang sangat baik dan retensi pada penuaan atau paparan lingkungan yang sulit, Resistensi yang luar biasa terhadap korosi dan terhadap beban fisik, kemampuan untuk *curing* pada berbagai suhu, serta kekuatan kelelahan yang sangat baik (Massingil dan Bauer, 2000).

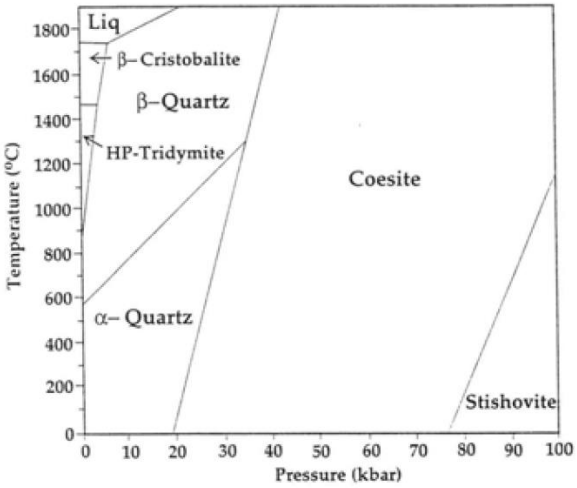
2.6 Silikon dioksida

Silikon dioksida (silika) merupakan bentuk oksida dari silikon dengan formula kimia yaitu SiO_2 dan bentuk partikel *spherical*. Silikon dioksida paling sering ditemukan dalam bentuk pasir atau kuarsa. Silika dapat ditemukan terpolimerisasi sendiri atau dalam kombinasi dengan logam lain yang dikenal sebagai silikat dalam bentuk kristal *quartz*. Bentuk kristal lain SiO_2 juga ditemukan seperti tridimit, kristobalit, dan juga dalam bentuk amorf (Lassalle dan Agotegaray, 2017). Bentuk struktur kimia tetrahedral dari silikon dioksida ditunjukkan pada Gambar 2.9 (El Khoury, 2017).



Gambar 2.9 Struktur kimia silikon dioksida (El Khoury, 2017)

Diagram fasa dari beberapa struktur yang dapat terjadi pada nanosilika dijelaskan secara detail pada Gambar 2.10 yang dimana struktur krsital *quartz*, *tridymite*, *cristobalite*, *coesite* dan *stishovite* terbentuk pada tekanan dan temperatur tertentu (Aasly dkk, 2007).



Gambar 2.10 Diagram fasa partikel silika (Aasly dkk, 2007)

Silika yang termasuk kedalam jenis oksida logam grup IV memiliki beberapa keunggulan sifat dalam aplikasinya diantaranya yaitu ketahanan abrasi yang baik, isolasi listrik, dan stabilitas termal yang tinggi. Silika tidak larut dalam semua jenis asam dengan pengecualian hidrogen fluorida (HF). Sifat fisik, mekanik, termal, dan listrik silika kuarsa dan *fused* silika ditunjukkan lebih teperinci pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Sifat fisik, mekanik, termal dan listrik kuarsa dan material silika (Azom, 2001)

Sifat Material	***Quartz***	***Fused Silica***
Densitas (g/cm^3)	2.65	2.2

Konduktivitas termal (Wm^{-1} K)	1.3	1.4
Koefisien ekspansi termal ($10^{-6}K^{-1}$)	12.3	0.4
Kekuatan Tarik (MPa)	55	110
Kekuatan Tekan (MPa)	2070	690-1380
Rasio Poisson	0.17	0.165
Ketangguhan patah (MPa)	-	0.79
Titik lebur (°C)	1830	1830
Modulus elastisitas (GPa)	70	73

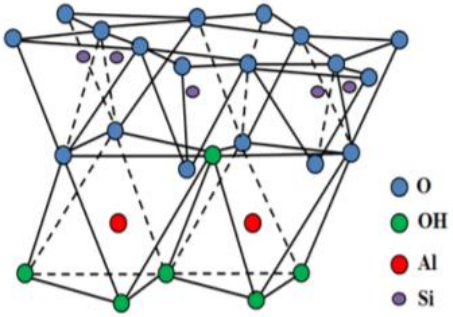
Secara umum, proses sintesis nanosilika partikel *solid* (*spherical*) terbagi menjadi tiga yaitu metode *stöber*, metode *reverse microemulsion*, dan deposisi uap kimia. Metode *Stöber* adalah metode yang paling sering digunakan hingga saat ini dengan cara menambahkan silikat dalam jumlah yang sesuai ke dalam campuran air, amonia, dan etanol yang kemudian diaduk untuk sintesis nanopartikel yang ukurannya tergantung pada konsentrasi pelarut dan aditif silikat. Kinetika dan karakterisasi partikel yang dihasilkan pada proses *Stöber* telah banyak diteliti agar secara tepat dapat mengontrol ukuran, bentuk, dan keseragamannya. Pada metode *Reverse Microemulsion*, mikroemulsi air dalam minyak dilakukan dengan larutan transparan surfaktan, minyak, dan air yang isotropik dan stabil secara termodinamik. *reverse micelle* terbentuk saat kelompok kepala polar dari pelarut mengatur sendiri sedemikian rupa sehingga membentuk *micro cavity* yang terisi dengan air. *Micelle* bulat dibentuk dengan melarutkan surfaktan dalam pelarut organik. Reaksi hidrolisis dan kondensasi silika terjadi pada antarmuka *micelle*. Nanopartikel terbentuk di dalam rongga-rongga setelah penambahan alkoksida silikon dan katalis secara terkontrol. Pada metode deposisi uap kimia, prekursor dibawa menuju fase uap, yang mendukung terjadinya nukleasi partikel. Dalam metode ini, silikon tetraklorida direaksikan dengan

H_2 dan O_2 untuk mendapatkan nanosilika dengan ukuran yang diinginkan (Singh dkk, 2019).

Dalam aplikasinya, partikel silika dapat digunakan pada berbagai kebutuhan. Silika merupakan bahan keramik yang cukup banyak digunakan baik sebagai prekursor untuk pembuatan produk keramik ataupun sebagai bahan sendiri. Silika dalam biomedis digunakan sebagai terapi anti kanker, pengantar obat, *bio imaging*, *bio sensing*, transfer gen, dan MRI. Silika dalam bentuk nanopartikel digunakan sebagai *filler* pada material komposit. Silika juga dapat digunakan sebagai pengisi cat, plastik, karet, perekat, dempul, dan sealant (Azom, 2001).

2.7 Halloysite

Halloysite adalah nanopartikel dengan rumus kimia $Al_2Si_2O_5(OH)4.2H_2O$ dan struktur kimia yang terdiri dari tetrahedral dan oktahedral. Halloysite adalah material yang ramah lingkungan dan serbaguna. Halloysite terdiri dari mineral aluminosilikat berlapis ganda dengan struktur tubular (*nanotubes*) yang dominan berongga dalam kisaran submicron dengan 1:1 rasio stoikiometrik. Halloysite adalah jenis nanomaterial yang unik karena terdiri dari lapisan ganda aluminium, silikon, hidrogen, dan oksigen. Halloysite memiliki ukuran diameter lebih kecil dari 100 nanometer, panjang berkisar dari 500 nanometer hingga lebih dari 1,2 mikron (Kamble dkk, 2012). Struktur tiga dimensi dari material halloysite ditunjukkan pada gambar 2.11 (Gaaz dkk, 2016).



Gambar 2.11 Struktur kimia dari Halloysite (Gaaz dkk, 2016)

Halloysite memiliki properti fisik secara umum dengan luas area spesifik 65 m^2/g, volume pori berkisar 1,25 mL/g, indeks bias 1.54, dan berat jenis 2,53 g/cm^3. Keunggulan daripada nanopartikel halloysite adalah sifatnya yang tidak beracun, ukuran partikel yang halus, luas permukaan yang tinggi, dan dispersi yang luar biasa. Halloysite dihasilkan secara alami di bumi dari pelapukan, pedogenesis atau perubahan hidrotermal batuan ultramafik, gelas vulkanik, dan batu apung yang di manufaktur dengan berbagai macam metode (Kamble dkk, 2012). Sifat mekanik dari material halloysite ditunjukkan secara terperinci pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Sifat material halloysite (Yang dkk, 2016)

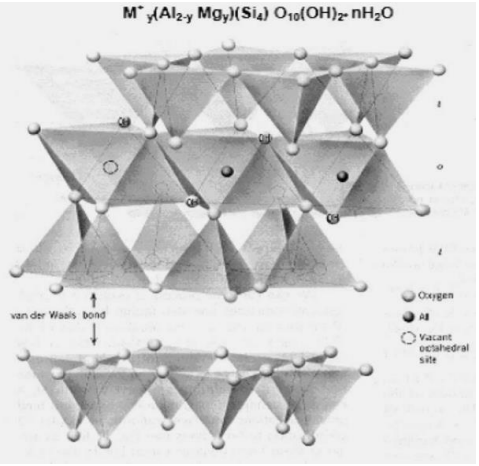
Sifat Material	Keterangan
Density(g/cm^3)	2 – 2,65
Young modulus (GPa)	1
Shear modulus (GPa)	0.4
Yield stress (MPa)	1000
Absolute shear stress (GPa)	0.1
Effective residual axial strain	4×10^{-6}

Halloysite nanotubes dapat dilakukan proses fungsionalisasi untuk meningkatkan sifatnya. Proses fungsionalisasi secara umum terbagi menjadi tiga metode diantaranya yaitu dengan pencangkokan γ-Aminopropyltriethoxysilane (APTES), pencangkokan asam 2-hydroxybenzoic sebagai ekstraksi fase padat, dan yang terakhir pecangkokan *co-polymer hiperbranched* melalui polimerisasi *self-condensing co-vinyl* dengan inisiasi permukaan.

Dalam aplikasinya, Halloysite *nanotubes* dapat digunakan untuk meningkatkan *capture of flowing cells*, *nanoreactors* atau template nano, *nanocontainers* (pelapis anti korosi dengan benzotriazole dan pelepasan inhibitor korosi yang terperangkap)., agen *controlled Release*, dan lain-lain. Halloysite dalam bentuk nanopartikel juga secara luas telah digunakan sebagai *filler* pada material komposit polimer (Kamble dkk, 2012).

2.8 Montmorillonite *nanoclay*

Montmorillonite *nanoclay* tersusun atas magnesium, aluminium, dan silikat yang merupakan anggota dari grup *smectite clay* dengan bentuk partikel *platelets* dan rumus kimia yaitu $(Ca_{0.014}Na_{0.02})(Al_{1.66}Mg_{0.36}Fe_{0.04})_2(Si_{3.90}Al_{0.10})_4O_{10}(OH)_2.1.02H_2O$. Struktur kimia dari montmorillonite nanoclay adalah oktahedral. Luas permukaan total montmorillonite dapat mencapai sebesar 750 m^2/g dengan aspek rasio yang tinggi. Bentuk partikel yang lebih kecil dari montmorillonite nanoclay dapat menghasilkan peningkatan luas permukaan per satuan volume atau per satuan massa, dimana kation yang signifikan dapat diserap. Struktur tiga dimensi dari material montmorillonite *nanoclay* ditunjukkan pada Gambar 2.12 (Uddin dkk, 2008)



Gambar 2.12 Formula dan struktur teoritis Montmorillonite nanoclay
(Uddin, 2008)

Montmorillonite nanoclay memiliki beberapa keunggulan sifat diantaranya adalah penyerapan air yang tinggi, kapasitas pertukaran kation yang tinggi, sifat ketahanan api yang baik, dekomposisi termal yang baik, dan konduktivitas listriknya yang tinggi dikarenakan mineral montmorillonite nanoclay merupakan material yang berpori. Keterangan lebih lanjut terhadap sifat fisik material montmorillonite nanoclay dijelaskan pada Tabel 2.4 dan Tabel 2.5 (Uddin, 2008).

Tabel 2.4 Fraksi oksida dari montmorillonite *nanoclay*
(Uddin, 2008)

No.	Konstituen oksida	kadar (%)
1	SiO_2	51.14
2	Al_2O_3	19.76
3	Fe_2O_3	0.83
4	MgO	3.22
5	CaO	1.62

6	Na_2O	0.11
7	K_2O	0.04
8	H_2O^+	7.99
9	H_2O^-	14.18
	Total	99.52

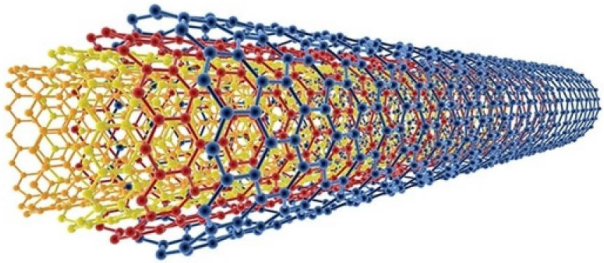
Tabel 2.5 Sifat fisik dari material montmorillonite *nanoclay* (Uddin, 2008)

No.	Sifat	Keterangan
1	Warna	Putih, abu-abu putih, kuning, kuning kecokleatan, dan kuning kehijauan
3	Patahan	tidak rata untuk lamelar
4	Kekerasan (mohs scale)	1.5 - 2.0
5	Densitas (g/cm^3)	2.0 - 2.7
6	Sistem Kristal	Monoklinik oktahedral

Metode sintesis montmorillonite nanoclay yang paling umum digunakan adalah perlakuan hidrotermal gel kering menggunakan autoklaf baja dan cawan lebur platinum. Komposisi gel dihitung menggunakan formula ideal dengan produk akhir $Na_{2x}(Al_{2(1-x),}\ Mg_{2x})\ Si_4O_{10}(OH)_2.nH_2O$ $(0<x<1)$. Pada proses tersebut kandungan aluminium akan berubah dan dapat menempati posisi oktahedral dan tetrahedral dalam struktur montmorillonite. Montmorillonite *nanoclay* secara luas banyak digunakan dalam berbagai aplikasi termasuk penggunaan sebagai aditif pada makanan dan kesehatan, serta sebagai katalis kimia dalam sintesis organik, dan sebagainya (Golubevaa dkk, 2013).

2.9 *Multi-Walled Carbon Nanotubes* (MWCNT)

Multi-walled carbon nanotubes telah menarik perhatian luar biasa karena sifat kelistrikan, optik, fisik, kimia, dan mekanik yang unik. MWCNT adalah modifikasi dari bentuk partikel karbon (*carbon-based*). MWCNT adalah material yang terdiri dari beberapa tabung dalam silinder konsentris. Jumlah dinding konsentris dapat bervariasi pada 6 – 25 atau lebih. Diameter MWCNT dapat mencapai 30 nm bila dibandingkan dengan jenis *single-walled carbon nanotubes* (SWCNT) yaitu 0,7 – 2,0 nm. Sifat unik dari karbon *nanotubes* memungkinkan penggunaannya dalam berbagai aplikasi baru dan peningkatan kinerja yang lebih baik. Struktur kimia tiga dimensi dari MWCNT ditunjukkan pada Gambar 2.13 (Azonano, 2013).



Gambar 2.13 Struktur Kimia *Multi-walled carbon nanotubes* (Azonano, 2013)

MWCNT memiliki sifat yang sangat baik sehingga banyak digunakan dalam sejumlah besar aplikasi komersial. Dinding luar MWCNT memiliki sifat konduktif, tetapi dinding bagian dalam tidak berperan untuk konduktivitas. MWCNT memiliki aspek rasio yang tinggi dengan panjang dapat mencapai 100 kali diameternya, dalam kasus tertentu dapat lebih tinggi. Keunggulan MWCNT diantaranya adalah pada sifat kelistrikan yang sangat konduktif (ketika diintegrasikan dengan benar ke dalam struktur komposit), bebas-cacat, kekuatan tarik yang sangat baik (ketika diintegrasikan ke dalam komposit polimer). MWCNT secara signifikan dapat

meningkatkan kekuatan komposit. Tingkat stabilitas termal dan stabilitas kimia yang tinggi di atas 600 °C juga menjadi keunggulan lain dari MWCNT dengan katalis residu dalam produk yang juga dapat mempercepat dekomposisi. Sifat fisik dari material *multi-walled carbon nanotubes* (MWCNT) ditunjukkan lebih terperinci pada Tabel 2.6 (Khan dkk, 2016).

Tabel 2.6 Sifat dari material *Multi-walled carbon nanotubes* (Khan dkk, 2016)

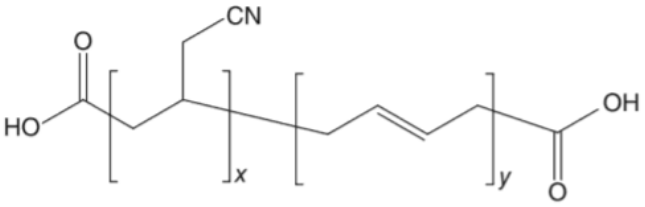
Sifat	Keterangan
Berat molekul	12.01
Tampilan	Serbuk Hitam
Densitas (g/cm^3)	~1.33
Diameter (μm)	0.001 – 0.1
Luas permukaan spesifik (m^2/g)	220
Kekuatan Tarik (GPa)	~50
Modulus (GPa)	~1000

Metode manufaktur dari material MWCNT dapat dibagi menjadi tiga macam yaitu, *ablation laser* yang menggunakan laser dengan daya tinggi untuk menguapkan sumber grafit dengan penambahan katalis logam. Karbon dalam grafit dapat terbentuk sebagai *single-walled nanotubes* pada partikel katalis logam. Metode *Arc discharge* melibatkan pelepasan listrik dari elektroda berbasis karbon di atmosfer yang sesuai untuk menghasilkan *single-walled* ataupun *multi-walled* berkualitas tinggi dalam jumlah rendah. Metode selanjutnya, Chemical *vapor deposition* (CVD) dengan bahan baku hidrokarbon direaksikan dengan katalis berbasis logam yang sesuai di dalam tungku panas untuk membentuk *nanotube* yang kemudian dikeluarkan dari substrat dan katalis dengan pencucian asam sederhana. Dalam aplikasinya, MWCNT digunakan di sejumlah bidang seperti *nano electronics*, *nanofluids*, manajemen energi, elektrokatalisis, ilmu material, konstruksi (bio) sensor dengan skema deteksi yang berbeda,

nanoprobe multifungsi untuk penggambaran biomedis, dan sorben untuk persiapan sampel atau menghilangkan kontaminan dari air limbah. MWCNT juga dapat digunakan sebagai agen anti-bakteri, *nanocarrier* pengiriman obat, dan sebagai *filler* pada nanokomposit (Azonano, 2013).

2.10 CTBN *Liquid rubber*

Carboxyl-terminated butadiene acrylonitrile adalah salah satu jenis karet cair yang memiliki gugus karboksil sebagai gugus fungsinya dan biasa disebut dengan kode CTBN. CTBN yang dibatasi dengan gugus asam karboksilat dapat mengikat hidrogen pada monomer amina dan dapat didispersikan secara homogen kedalam campuran. CTBN dapat diterapkan dan dikombinasikan dengan resin *somatotype*. CTBN yang memiliki gugus karboksil aktif dapat bereaksi dengan resin epoksi untuk meningkatkan ketangguhan dari polimer epoksi. CTBN dengan persentase yang bervariasi telah digunakan untuk meningkatkan ketangguhan pada matriks polimer dengan mencampurkannya secara langsung. Struktur kimia dari material CTBN *liquid rubber* ditunjukkan pada Gambar 2.14 (Thomas dkk, 2014).



Gambar 2.14 Struktur Kimia CTBN *Liquid rubber* (Thomas dkk, 2014)

Morfologi CTBN dikendalikan oleh kombinasi pertumbuhan nukleasi dan mekanisme dekomposisi spinodal. Pemisahan fase oleh nukleasi dan pertumbuhannya menghasilkan partikel karet yang lebih besar daripada pemisahan fase oleh dekomposisi spinodal. CTBN terlarut bertindak sebagai *plasticizer* dengan

mengubah kepadatan *cross-link* pada tingkat penggabungan yang tinggi (Thomas dkk, 2014). CTBN *liquid rubber* memiliki beberapa keunggulan sifat diantaranya adalah sifat ketangguhan, ketahanan lelah, fleksibilitas, daya adhesi, dan ketahanan impak yang baik bila ditambahkan ke dalam jenis resin termoset termasuk seperti epoksi. CTBN adalah keluarga dari homopolimer butadiena dan kopolimer butadiena-akrilonitril. Sifat kimia dan sifat fisik dari material CTBN *liquid rubber* dijelaskan lebih rinci pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Sifat material CTBN *liquid rubber* (CVC Thermoset Specialties, 2012)

Sifat Material	Keterangan
Konten Akrilonitril (%)	26
Konten Karboksil (%)	32
Viskositas (MPa.s)	500000
Parameter kelarutan (cal/cm^3)	9.15
Berat jenis (g/cm^3)	0.96
Berat molekul (g/mol)	3150
Glass Transition Temperature (℃)	-39

CTBN *liquid rubber* disintesis secara kopolimerisasi radikal bebas dengan mencampurkan 4,4'-azobis (asam 4-sianopentanoat) (ACVA) sebagai inisiator dengan pelarut yang sesuai. Kopolimerisasi adalah proses reaksi secara kimia dari material butadiene acrylonitrile dengan material carboxyl. Proses kopolimerisasi terjadi secara radikal dan setiap segmen inisiator berasal dari ACVA. Pembatasan (*termination*) yang dilakukan melalui penggandaan akan memiliki satu kelompok karboksil. Kopolimer CTBN yang dihasilkan memiliki gugus karboksil rata-rata berjumlah 2 sehingga, menggolongkan CTBN *liquid rubber* kedalam bentuk *soft* nanopartikel (Chen dkk, 1994).

CTBN *liquid rubber* dalam aplikasinya dapat digunakan secara umum dalam bidang penerbangan dan industri sipil. CTBN

liquid rubber juga digunakan sebagai perekat film, perekat aplikasi struktural dan semi-struktural, pelapis (larutan, Serbuk, *waterborne*), perantara polimer (epoksi, vinyl ester, akirilik, dan *phenolics*), dirgantara, otomotif, peralatan listrik/elektronik, Industri, kelautan, dan konstruksi (CVC Thermoset Specialties, 2012).

2.11 Manufaktur Komposit

Komposit dapat dibentuk dengan berbagai macam metode pembuatan mulai dari metode konvensional hingga metode modern. Berikut beberapa macam metode manufaktur komposit yang dapat digunakan.

1. *Open Molding*

Resin diberikan pada serat yang ditempatkan dalam cetakan terbuka, dimana komposit akan terjadi *Curing* lalu mengeras. Beberapa hal yang perlu diperhatikan seperti biaya yang relatif rendah, memungkinkan siklus pengembangan produk yang cepat untuk pembuatan *prototype.* Perubahan desain mudah dilakukan. Potensi ukuran bagian lebih lebar. Proses finishing sekunder diperlukan karena hanya satu sisi dari bagian yang memiliki permukaan akhir yang baik (sisi yang berlawanan dengan cetakan). *Open molding* terbaik untuk produksi volume rendah dan geometri yang besar dan kompleks.

Open molding terdiri dari tiga macam metode yaitu:

a. *Hand Lay-up* adalah proses manufaktur komposit yang dimana prosesnya dengan menumpuk beberapa layer serat kemudian resin cair ditempatkan di permukaan serat lalu kemudian rol digunakan untuk menekan laminat, merapatkan serat, dan menghilangkan udara yang terperangkap. Pada proses ini juga katalis dapat digunakan untuk memulai pengeringan (pengerasan) dari sistem resin sehingga produk dapat *Curing* tanpa panas eksternal. Ini adalah metode paling sederhana dan termudah. *Hand lay-up* biasanya digunakan dalam produksi volume rendah pada

struktur yang biasanya lebih besar seperti komponen untuk turbin angin.

b. *Spray Up* adalah proses manufaktur komposit yang tidak jauh berbeda dengan *hand lay-up* namun proses pencampuran resin terhadap serat menggunakan alat semprot. Lalu, proses *manual rolling* dapat dilakukan untuk menghilangkan udara yang terperangkap. Metode ini biasanya digunakan untuk cetakan dengan kompleksitas yang lebih besar dibandingkan pada proses *hand lay-up* serta untuk produksi yang lebih cepat.

c. *Filament winding* adalah proses manufaktur komposit yang digunakan untuk menghasilkan produk berbentuk tabung yang memiliki tingkat integritas struktural yang tinggi (tangki, pipa, bejana tekan, dsb). Prosesnya menggunakan Mandrel berputar yang digunakan sebagai cetakan otomatis. Serat yang telah diberikan resin dililitkan di sekitar mandrel (cetakan) ke dalam pola geometris yang telah ditentukan.

2. *Closed Molding*

Bahan komposit ditempatkan dalam cetakan dua sisi yang tertutup. *Closed Molding* memungkinkan untuk geometri bagian yang lebih kompleks, Menghasilkan komponen yang lebih baik, cepat, konsisten daripada proses pencetakan terbuka, sedikit limbah yang dihasilkan, dan lebih mahal karena kebutuhan perlengkapan.

a. *Vacuum Bagging* adalah proses manufaktur komposit menggunakan *bagging film* sebagai penutup *mold* agar dapat terciptanya kondisi vakum. Bahan lain didalamnya adalah *release film* yg diletakkan diatas laminat kemudian diikuti *bleeder ply* untuk menyerap kelebihan resin dalam prosesnya. Pompa vakum digunakan untuk menciptakan suasan vakum dan menghilangkan rongga dan menarik keluar kelebihan resin.

b. *Vacuum Infusion* adalah proses manufaktur komposit yang lebih unggul dibandingkan dengan proses sebelumnya karena hasil yang lebih baik. Lapisan penguat dan inti

dibentangkan pada cetakan. Lalu, *peel ply* dan *vacuum bag* menutupi cetakan pada proses vakum. Metode ini memungkinkan memproduksi struktur dengan ukuran yang lebih besar.

c. *Resin Transfer Molding (*RTM*)* adalah proses manufaktur komposit dengan metode injeksi dengan hasil kedua sisi baik dalam permukaannya. Lapisan penguat dibentangkan pada *tool cavity dry*. *Cavity* menentukan ketebalan komposit. Metode ini digunakan untuk struktur ukuran kecil maupun besar. Penguatan selektif dan manajemen serat yang akurat dapat dicapai. Kemampuan untuk memuat fraksi volume serat hingga 65%. Tambahan dapat dimasukkan ke dalam cetakan. Keuntungan RTM adalah toleransi dimensi yang tinggi dan stabil, permukaan akhir unggul, tingkat produksi tinggi, pengulangan tinggi dan variabilitas terendah dari bagian ke bagian. *finishing* pasca proses jarang diperlukan. Kerugian RTM adalah biaya alat yang lebih tinggi dan waktu yang lebih lama untuk membuat alat yang tepat secara dimensi.

d. *Compression Molding* adalah proses manufaktur komposit dengan volume dan tekanan tinggi secara otomatis untuk bentuk yang kompleks. perkakas dipasang dalam alat tekan hidrolik dan muatan (material cair yang terdiri dari matriks dan penguat) ditempatkan ke dalam cetakan dan kemudian ditutup pada tekanan dan suhu tertentu untuk waktu tertentu (waktu siklus). Kombinasi ini mempercepat proses *curing* material.

e. *Pultrusion* adalah proses manufaktur kontinu otomatis yang dapat disesuaikan untuk bentuk sederhana dan kompleks dengan penampang konstan. Sangat hemat biaya dalam pengaturan volume produksi tinggi. Bentuk standar adalah balok, saluran, sudut, batang, tabung, lembaran, dsb (Frank, 2014).

2.12 Aplikasi Nanokomposit

Nanokomposit dalam aplikasinya menarik banyak industri karena memiliki berbagai macam keunggulan akibat dari peningkatan *specific surface area* oleh partikel yang mengakibatkan peningkatan terhadap sifat mekanik dari material komposit. Salah satu penggunaan nanokomposit adalah pada miniaturisasi perangkat di bidang medis, ruang angkasa, pertahanan, dan elektronik. Aplikasi yang lebih umum saat ini dan sedang dikembangkan adalah penggunaannya sebagai baling-baling dan pisau untuk penyedot debu, alat kelistrikan, kap mesin pemotong, dan pelindung untuk peralatan elektronik portabel (ponsel, pager, dsb) (Azom, 2001). Nanokomposit polimer dapat digunakan sebagai material laminat dan gelcoat. Beberapa standarisasi menggunakan resin epoksi pada aplikasi laminat dan gel coat, seperti pada data Biro Klasifikasi Indonesia yang ditunjukkan pada Tabel 2.8 berikut

Tabel 2.8 Standarisasi penggunaan resin epoksi gel coat dan laminat pada kapal laut (Biro Klasifikasi Indonesia, 2014)

Properties	Nilai
Tensile Strength (MPa)	55
Fracture Strain (%)	2.5
Modulus of Elasticity (MPa)	2700
Bending Strength (MPa)	100
Dimensional stability under heat (^oC)	70

Kemudian terdapat spesifikasi gel coat pada pipa polimer yang menggunakan *thermoseting* resin seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.9 dan spesifikasi resin laminat pada Tabel 2.10.

Tabel 2.9 Standarisasi penggunaan resin epoksi gelcoat pada pipa polimer (Lloyd's Register Group, 2018)

Properties	Nilai
Tensile Strength (N/mm^2)	40
Tensile stress at break (N/mm^2)	40

Flexural Strength (N/mm^2)	80
Water Absorption max. (mg)	70

Tabel 2.10 Standarisasi penggunaan resin epoksi laminat pada pipa polimer (Lloyd's Register Group, 2018)

Properties	Nilai
Tensile Strength (N/mm^2)	40
Tensile stress at break (N/mm^2)	40
Tensile strain at maximum load (%)	2
Temperatur of deflection under load (℃)	55

Berbagai jenis nanopartikel yang ditambahkan ke dalam polimer telah menunjukkan keunggulannya masing-masing diantaranya adalah nanosilika, halloysite, CTBN *liquid rubber*, MWCNT, dan montmorillonite nanoclay. Nanosilika yang ditambahkan ke dalam polimer digunakan pada aplikasi maritim *coating materials* dengan ketebalan *coating* mencapai 50 µm. Penambahan nanosilika digunakan karena ketahanan korosi dan ausnya dalam air laut. Nanosilika secara signifikan dapat meningkatkan sifat mekanik dari polimer epoksi terutama dalam kekuatan, ketangguhan patah, ketahanan gores/*creep*, ketahanan korosi, dan beberapa sifat lainnya dari nanokomposit (Tang dan Ye, 2015).

Halloysite yang ditambahkan ke dalam polimer telah digunakan pada berbagai aplikasi diantaranya adalah sebagai katalitik, magnetik, dan antibakteri. Di bidang katalisis lingkungan, nanokomposit berbasis Halloysite menawarkan berbagai keuntungan, seperti pemulihan yang sederhana, tingkat *turnover* yang tinggi, kondisi eksperimental, selektivitas, dan hasil yang baik. Hal tersebut menjadikan nanokomposit berpenguat halloysite sebagai fondasi yang berguna dalam pembentukan teknologi ramah lingkungan. Selain itu, nanokomposit berpenguat halloysite juga digunakan sebagai material *magnetic* dan material antibakteri karena sifat kemagnetan yang baik serta bersifat *non-toxic*. Nanopartikel magnetik dengan sifat super paramagnetik telah

dipelajari secara intensif pada aplikasi teknologi potensialnya, termasuk untuk penyerapan gelombang mikro, bio-separasi, dan perawatan kanker hipertermik. (Zhang dkk, 2015). Halloysite sebagai penguat dalam polimer epoksi juga telah diaplikasikan pada material *coating* karena sifat ketahanan air, *anti fouling*, dan pelapisannya yang baik (Vijayan dkk, 2016).

Montmorillonite *nanoclay* yang ditambahkan ke dalam polimer telah digunakan secara luas dalam kemasan makanan karena dapat mempertahankan kesegaran makanan lebih lama akibat dari sifat penghalang gas yang baik. komposit yang diperkuat montmorillonite *nanoclay* adalah material yang tidak mudah terbakar, khususnya pada tingkat pelepasan panas yang baik. Meskipun penambahan partikel mikro konvensional juga akan meminimalkan perilaku mudah terbakar, partikel mikro biasanya disertai dengan penurunan dalam berbagai sifat mekanik penting lainnya. Dengan pendekatan *nanoclay* hal tersebut dapat dicapai dengan mempertahankan atau meningkatkan sifat dan karakteristik lainnya (Azom, 2001). Nanokomposit yang diperkuat *nanoclay* juga digunakan sebagai pelindung pada peluru balistik karena sifat ketahanan impaknya yang baik (Dong Ma dkk, 2009).

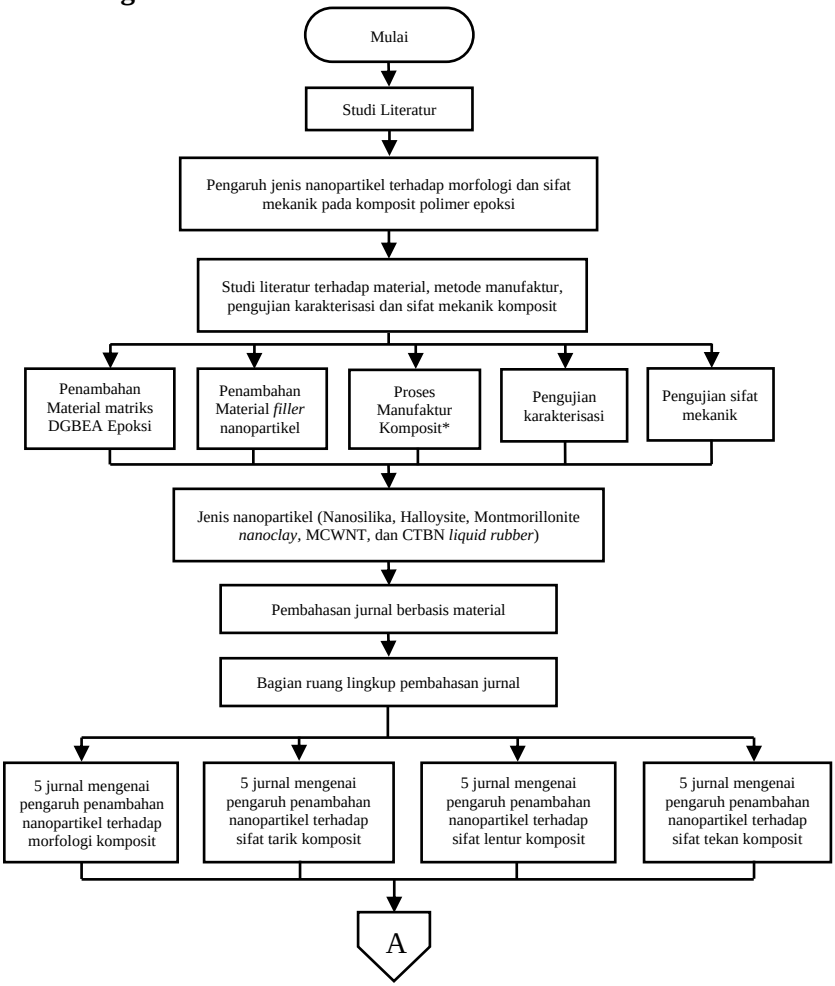
Multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) yang ditambahkan ke dalam polimer telah digunakan pada berbagai aplikasi yang menguntungkan karena peningkatan sifat mekanik yang diberikan, terutama dalam memajukan teknologi satelit karena kapasitasnya untuk dapat mengurangi interferensi elektromagnetik (EMI) dan dapat menjaga kompatibilitas elektromagnetik (EMC) terkendali. Sehingga, jenis nanokomposit ini adalah kandidat yang baik untuk aplikasi luar angkasa (Nicoletto dkk, 2015). MWCNT juga diaplikasikan pada komponen superkapasitor (*specific surface area* yang tinggi), *bio sensor*, *sollar cells*, bahan penyerap radar, dan perlindungan korosi dalam bentuk coating (Ates dkk, 2017). MWCNT sebagai *filler* pada polimer epoksi menjadi pilihan karena sifat ketahanan air dan adhesinya yang baik (Jeon dkk, 2013).

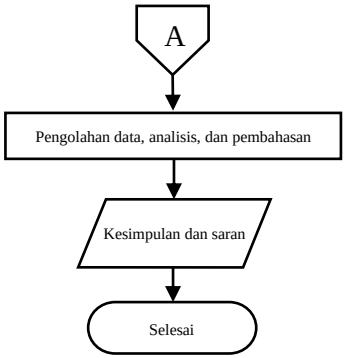
CTBN *Liquid rubber* yang ditambahkan ke dalam polimer memiliki beberapa keunggulan dan telah memikat perhatian walaupun, dalam aplikasinya masih sangat terbatas. CTBN *Liquid rubber* memiliki fleksibilitas, stabilitas kimia, dan termal yang unggul. Sifat-sifat ini membentuk nanokomposit yang diperkuat CTBN *liquid rubber* dapat mencolok pada penggunaan yang berbeda. Beberapa sifat mekanik pada nanokomposit yang diperkuat CTBN *liquid rubber* banyak mengalami penurunan. Di sisi lain, CTBN *liquid rubber* memiliki keunggulan dalam ketahanan impak material dan peningkatan koefisien difusi bila dilakukan hibridisasi dengan jenis partikel lainnya (Vijayan dkk, 2015). CTBN *liquid rubber* yang ditambahkan pada polimer epoksi telah diaplikasikan pada material pelapisan karena sifat fleksibilitasnya yang baik (Kaynak dkk, 2002).

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB III
METODOLOGI

3.1 Diagram Alir





Gambar 3.1 Diagram Alir pembahasan jurnal

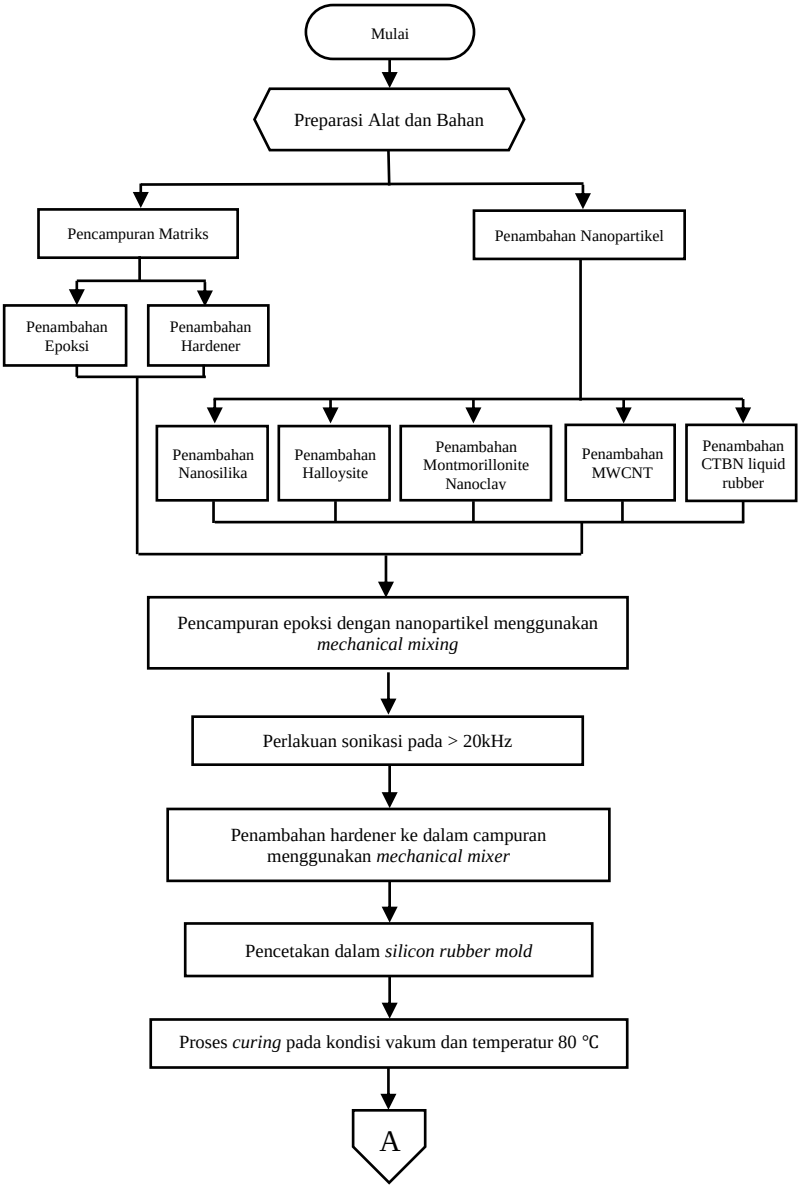
Pada Gambar 3.1 ditunjukkan metodologi pembahasan jurnal. Topik yang diambil adalah tinjauan jenis nanopartikel terhadap morfologi dan sifat mekanik pada nanokomposit polimer epoksi. Studi literatur dilakukan terhadap material, metode manufaktur, pengujian karakterisasi dan sifat mekanik nanokomposit. pembahasan jurnal dilakukan dengan basis material. Material yang dibahas adalah polimer epoksi, nanosilika, halloysite, montmorillonite *nanoclay*, mwcnt, dan CTBN *liquid rubber*. Pengolahan data, analisis, dan pembahasan dilakukan untuk mendapatkan kesimpulan dari pembahasan jurnal. Proses manufaktur komposit dijelaskan lebih rinci pada Gambar 3.2.

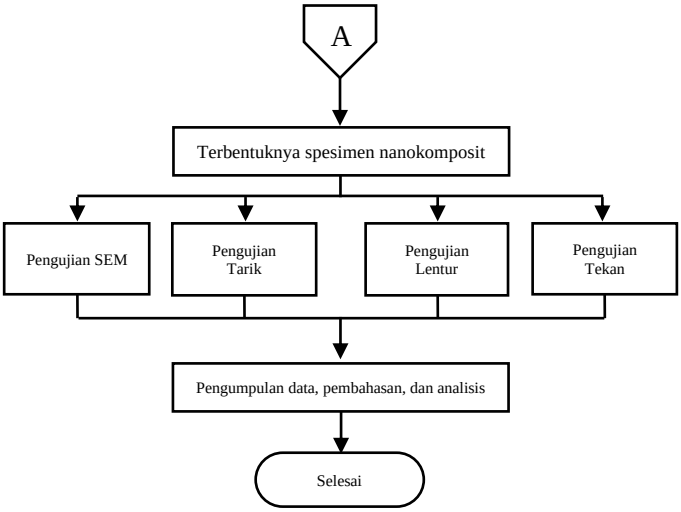
3.2 Material dan Metode Manufaktur

Review ini telah mengelompokkan masing-masing material penyusun, metode manufaktur, pengujian, dan ruang lingkup pembahasan seperti yang dijelaskan pada Tabel 3.1, Tabel 3.2, dan Gambar 3.2.

Tabel 3.1 Material dan metode manufaktur

Matriks	Nanopartikel	Metode Manufaktur	Pengujian	Referensi
Epoksi	Nanosilika	*Mechanical Mixing*, Sonikasi, dan Vakum	Tarik, Tekan	(Liu dkk, 2017)
			SEM, Tarik, Lentur	(Xiao dkk, 2018)
			Tarik	(Constantinscu, dkk 2017)
Epoksi	Halloysite	*Mechanical Mixing*, Sonikasi, dan Vakum	Tarik, Tekan	(Liu dkk, 2017)
			SEM	(Deng dkk, 2008)
			Tarik, Lentur	(Ravichandran dkk, 2017)
Epoksi	Montmorillonite *Nanoclay*	*Mechanical Mixing*, Sonikasi, dan Vakum	Tarik, SEM	(Ho dkk, 2006)
			Tarik, Lentur	(Alsagayar dkk, 2015)
			Tekan	(Jumahat dkk, 2012)
Epoksi	*Multi-walled carbon nanotubes* (MWCNT)	*Mechanical Mixing*, Sonikasi, dan Vakum	SEM, Tarik, Lentur	(Xiao dkk, 2018)
			SEM, Tarik	(Montazeri dkk, 2010)
			Tekan	(Zarasvand dkk, 2017)
Epoksi	CTBN *Liquid Rubber*	*Mechanical Mixing* dan Vakum	Tarik, Tekan	(Liu dkk, 2017)
			SEM, Tarik, Lentur	(Tripathi dan Srivastava, 2007)
			SEM, Tarik	(Zhang dkk, 2016)


Mulai
Preparasi Alat dan Bahan
Pencampuran Matriks
Penambahan Nanopartikel
Penambahan Epoksi
Penambahan Hardener
Penambahan Nanosilika
Penambahan Halloysite
Penambahan Montmorillonite Nanoclay
Penambahan MWCNT
Penambahan CTBN liquid rubber
Pencampuran epoksi dengan nanopartikel menggunakan *mechanical mixing*
Perlakuan sonikasi pada > 20kHz
Penambahan hardener ke dalam campuran menggunakan *mechanical mixer*
Pencetakan dalam *silicon rubber mold*
Proses *curing* pada kondisi vakum dan temperatur 80 ℃
A



Gambar 3.2 Diagram alir proses manufaktur nanokomposit secara umum

Proses sonikasi adalah proses pemberian gelombang ultrasonik terhadap campuran untuk menciptakan kondisi eksfoliasi atau persebaran yang lebih baik dari nanopartikel pada polimer epoksi dengan frekuensi diatas 20 kHz. Proses *mechanical mixing* adalah proses pencampuran menggunakan alat *mixer* pada rpm tinggi dan waktu tertentu untuk menciptakan campuran nanokomposit yang lebih homogen.

3.3 Variabel Pembahasan Jurnal

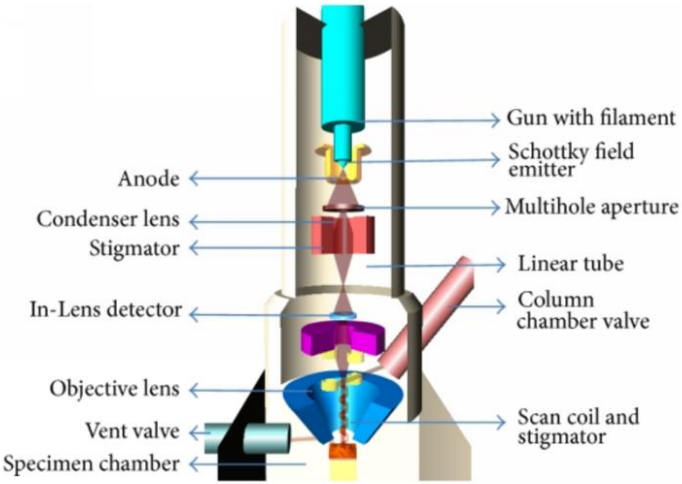
Variabel pembahasan di tentukan setelah dilakukan studi literatur teradap material dan metode manufaktur. Variabel pembahasan ditentukan berdasarkan jenis nanopartikel yang digunakan terhadap morfologi dan sifat mekanik nanokomposit material polimer epoksi yaitu partikel nanosilika, halloysite, montmorillonite nanoclay, *multi-walled carbon nanotubes* (MWCNT), dan CTBN *liquid rubber* yang terdiri masing-masing minimal 3 jurnal utama pada setiap materialnya, 5 jurnal dengan

ruang lingkup pembahasan nanopartikel terhadap morfologi komposit, 5 jurnal dengan ruang lingkup pembahasan nanopartikel terhadap sifat tarik, 5 jurnal dengan ruang lingkup pembahasan nanopartikel terhadap sifat lentur, 5 jurnal dengan ruang lingkup pembahasan nanopartikel terhadap sifat tekan.

3.4 Pengujian Material

3.4.1 SEM (*Scanning Electron Microscope*)

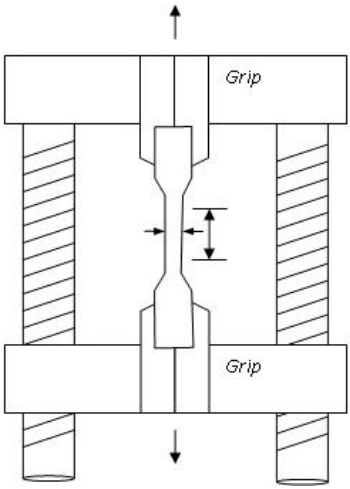
Pengujian SEM memiliki tujuan untuk mengetahui morfologi (struktur permukaan), ukuran partikel dan pori, serta bentuk partikel suatu material. Pengujian SEM didasarkan pada standard ASTM E986. Spesimen uji berbentuk balok kecil berukuran 10 mm x 10 mm x 3 mm. Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscope*) menghasilkan hamburan elektron yang ditangkap oleh *detector* sehingga dapat membentuk suatu gambar yang nampak seperti 3 dimensi. Cara kerja dari SEM adalah *electron gun* memproduksi *electron beam*, anoda menangkap *electron beam* untuk kemudian diarahkan ke sampel kemudian serangkaian lensa magnetik memfokuskan *beam* dan menembakkan ke sampel, *scanner* membaca struktur permukaan sampel, selanjutnya menangkap sinyal dari *secondary* dan *back scattered electron* untuk dikirim ke sistem kontrol. Sehingga, dapat dilihat gambarnya pada monitor dan dapat dicetak bila diperlukan.



Gambar 3.3 Mekanisme pengujian SEM

3.4.2 Kekuatan Tarik

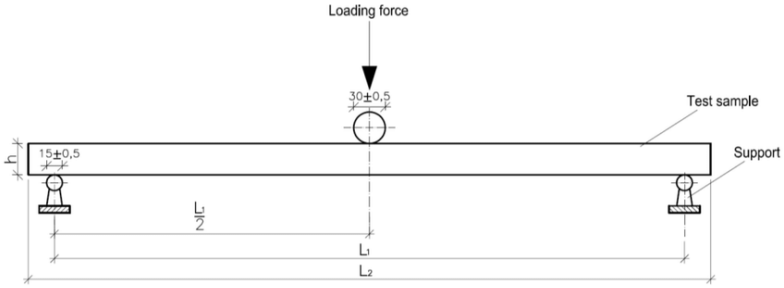
Pengujian Tarik dilakukan untuk mengetahui sifat tarik dari material. Pengujian Tarik menunjukkan kekuatan maksimal dari sebuah pembebanan secara vertikal dua arah (atas dan bawah) pada sebuah material. Mekanisme uji Tarik bekerja dengan memberikan beban konstan hingga material mengalami kegagalan. Standar yang digunakan pada uji Tarik adalah ASTM D3039 *Balance and Symmetric* dengan dimensi 250 mm x 25 mm x 6 mm.



Gambar 3.4 Mekanisme pengujian Tarik dan Tekan

3.4.3 Kekuatan Lentur

Pengujian kekuatan lentur digunakan untuk menunjukkan sifat kekakuan dari material ketika terjadi pembengkokkan. Pengujian ini dilakukan dengan Metode *Three Point Bending*, dimana spesimen akan diletakan pada 2 tumpuan dan dilakukan pembebanan dari arah tengah spesimen. Standar pengujian yang digunakan adalah ASTM D-790 berdimensi 127 mm x 12,7 mm x 3 mm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Mekanisme pengujian lentur (*three point bending*)

3.4.4 Kekuatan Tekan

Pengujian tekan bertujuan untuk menganalisis perubahan secara fisika pada material dengan melakukan pembebanan tekan terhadap material. Spesimen uji berbentuk balok dengan dimensi 140 mm x 12 mm x 3 mm. pengujian ini dilakukan dengan melakukan pembebanan geser pada spesimen, dimana spesimen bagian atas dan bawah diletakkan pada grip kemudian diberikan pembebanan tekan. Pengujian tekan dilakukan berdasarkan standard ASTM D3410 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4.

3.5 Ruang lingkup pembahasan

Langkah selanjutnya setelah dilakukan pendataan terhadap material, proses manufaktur, variabel, dan pengujian material dari literatur adalah melakukan penentuan ruang lingkup pembahasan yang akan dilakukan nantinya seperti pada Tabel 3.2

Tabel 3.2 Ruang lingkup pembahasan

Material	M	TP	CP	FP
Epoksi/Nanosilika	V	V	V	V
Epoksi/Halloysite	V	V	V	V
Epoksi/Montmorillonite nanoclay	V	V	V	V
Epoksi/MWCNT	V	V	V	V
Epoksi/ CTBN *Liquid rubber*	V	V	V	V

Keterangan:
M = Morfologi
TP = Sifat Tarik
CP = Sifat Tekan
FP = Sifat Lentur

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

Review jurnal ini dilakukan dengan pembahasan berbasis material berdasarkan jenis nanopartikel sebagai berikut.

4.1 Epoksi/Nanosilika

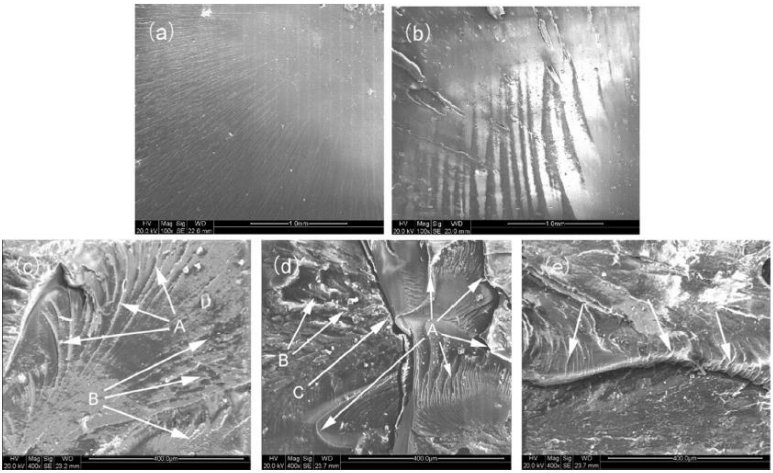
Chufan Xiao, dkk pada tahun 2018 telah melakukan penelitian mengenai material nanokomposit epoksi/nanosilika. Material yang digunakan adalah partikel nanosilika dengan diameter rata-rata sekitar 15 nm yang diproduksi oleh Shanghai Maikun Chemical Co., Ltd, Cina dan Bisphenol A resin epoksi (E-44) dengan nilai epoksi 0,44 mol/100 g yang diperoleh dari Taizhou Huili Electronic Material Co, Ltd, Cina. *Curing agent* yang digunakan adalah polieter amina (D-230) yang diproduksi oleh Suzhou Chanco Industrial Co., Ltd, Cina. Pada penilitian yang dilakukan oleh Fang Liu, dkk pada tahun 2017 material yang digunakan adalah resin epoksi DGEBA yang diproduksi oleh Araldite-F, Huntsman. *Hardener* yang digunakan yaitu piperidine yang diproduksi oleh Sigma–Aldrich, Australia. Rasio yang digunakan yaitu 100:5 berdasarkan berat. Nanosilika yang digunakan dalam epoksi yaitu Nanopox XP yang diproduksi oleh Nano resin, Germany. Nanopox XP terdiri dari nanopartikel silika termodifikasi (40wt.%). Ukuran partikel rata-rata 20 nm. Sedangkan, pada penelitian yang dilakukan oleh Dan M. Constantinescu, dkk pada tahun 2017 material yang digunakan adalah resin epoksi jenis neukadur EP 986 yang diproduksi oleh Altropol Kunststoff GmbH, Jerman. *Hardener* yang digunakan jenis Neukadur HN 242 (dengan waktu pot 25 menit). Partikel nanosilika yang digunakan diproduksi oleh Sigma Aldrich dengan diameter 5 – 15 nm dan kemurnian 99,5% berat dengan beberapa jejak logam.

Proses manufaktur pada penelitian oleh Chufan Xiao, dkk pada tahun 2018 adalah melakukan degradasi terlebih dahulu terhadap epoksi pada temperatur 70 ℃ selama 12 jam. Campuran nanosilika dan epoksi kemudian dilakukan proses pengadukan

secara mekanik (tipe JJ-1A, Changzhou Kaihang Instrument Co., Ltd.) selama 12 jam (kecepatan putaran pengaduk 2500 rpm). Dispersi dari nanopartikel ditingkatkan dengan cara memasukkan campuran kedalam *ultrasonic bath* tipe KQ-250DB *ultrasonic treatment machine* yang diproduksi oleh Kunshan Ultrasonic Instruments Co., Ltd. Setelah itu, *curing agent* polieter amina (D-230) ditambahkan pada campuran dan didispersikan dalam ultrasonik *bath* (40 kHz, 125 Watt) selama 30 menit (suhu 40℃) dengan kecepatan pengadukan 1500 rpm. Campuran kemudian dilakukan proses vakum selama 30 menit. Lalu, dituangkan kedalam *mold* yang telah dilapisi *release agent*. Tahap terakhir yaitu pendiaman pada temperatur 25℃ selama 24 jam dan 60℃ selama 12 jam. Proses manufaktur yang dilakukan pada penelitian oleh Fang Liu, dkk pada tahun 2017 adalah pencampuran matriks epoksi DGEBA dengan partikel nanosilika atau Nanopox XP menggunakan *mechanical mixer* pada temperatur 80℃ selama 1 jam. Setelah itu, campuran ditambahkan dengan *hardener* pada perbandingan 100:5 berdasarkan berat. lalu, diaduk menggunakan *mechanical mixer* selama 5 menit. Buble pada komposit dihilangkan pada oven vakum (sekitar -100 KPa) selama sekitar 30 menit. Proses curing dilakukan dalam mold *silicon rubber* pada temperatur 80℃ selama 16 jam. Sedangkan, proses manufaktur yang dilakukan pada penelitian Dan M. Constantinescu, dkk pada tahun 2017 adalah proses pencampuran resin epoksi dengan nanosilika menggunakan *mechanical mixer* Thinky ARE-250 (Jepang) selama 10 menit dengan kecepatan rotasi 1500 rpm. Campuran kemudian disonikasi selama 2 jam menggunakan *Sonicator* berenergi tinggi, Sonics VCX-750 (AS) dengan *generator output* 750 W, konverter 20 kHz, dan pengontrol suhu. Campuran selanjutnya dimasukkan ke dalam oven vakum Memmert VO 400 (UK) pada 30 mbar dengan temperatur ruang untuk proses degassing. Kemudian, campuran dicampurkan dengan *hardener*. Tahap akhir dari proses adalah penuangan campuran ke dalam cetakan silicon.

4.1.1 Morfologi

Morfologi material nanokomposit yang diperkuat oleh nanosilika telah diteliti oleh Chufan Xiao, dkk pada tahun 2018 melalui pengujian *Scanning electron microscope* (SEM, Hitachi S4800) dengan penambahan nanopartikel dengan kadar 0, 1, 2, 3, dan 4%. Perbesaran yang dilakukan dalam pengujiannya adalah perbesaran pada 100 dan 400x yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Hasil Pengujian SEM material nanokomposit yang diperkuat nanosilika (a) tanpa penambahan (b) 1% nanopartikel (c) 2% nanopartikel (d) 3% nanopartikel (e) 4% nanopartikel
(Xiao dkk, 2018)

Partikel nanosilika ditunjukkan oleh warna cerah atau flek putih pada gambar SEM yang tersebar cukup seragam di seluruh bagian material polimer epoksi. Warna cerah atau flek putih pada gambar SEM semakin banyak terlihat seiring dengan penambahan dari partikel nanosilika. Dapat dilihat juga bahwa terjadi tegangan permukaan di beberapa titik yang tampak jelas antara partikel dan permukaan polimer epoksi melalui sudut-sudut yang terbentuk

pada permukaan material seiring dengan penambahan kadar tertentu dari nanolsilika yang terjadi pada material nanokomposit berpenguat partikel seperti yang ditunjukkan pada gambar.

Pada hasil pengujian SEM, morfologi dari permukaan material nanokomposit yang diperkuat partikel nanosilika tersebar cukup seragam pada material polimer epoksi yang menandakan cukup baiknya sifat ketercampuran material nanosilika dalam polimer epoksi. Pada penelitiannya Chufan Xiao, dkk juga membahas terkait hasil pengujian SEM terhadap kekasaran permukaan dan pengaruhnya pada sifat mekanik dari material nanokomposit. dimana pada penambahan partikel nanosilika menyebabkan terjadinya peningkatan kekasaran permukaan pada material. Pada gambar 4.1 terlihat jelas pada Epoksi tanpa penambahan nanopartikel menunjukkan permukaan yang mulus dengan sedikit *micro crack* yang tergolong kedalam jenis patahan getas. Lalu, pada penambahan nanopartikel dengan kadar tertentu menyebabkan permukaan menjadi tidak rata dan mengalami peningkatan kekasaran pada permukaan material yang ditandai dengan semakin banyaknya terdapat *micro crack* dan semakin besar daerah deformasi mikroplastik yang terbentuk atau biasa disebut sebagai fenomena divarikasi.

Dari hasil analisis tersebut dapat dikatakan bahwa nanosilika jenis *spherical* pada nanokomposit secara umum terjadi dalam bentuk *mechanical inter-lock* yang tersebar secara eksfoliasi sehingga dapat meningkatkan *mechanical adhesion* antara matriks dan penguat. Hal ini didukung oleh hasil pengujian SEM yang menunjukkan terjadinya peningkatan kekasaran dan tegangan permukaan seiring dengan penambahan nanopartikel pada kadar yang ditentukan. Sehingga dapat dikatakan bahwa dengan adanya peningkatan pada *mechanical adhesion* maka, sifat mekanik pada nanokomposit juga akan mengalami peningkatan secara signifikan akibat dari sifat dan karakteristik yang diberikan oleh partikel nanosilika pada konten yang tepat dan situasi distribusi dari nanopartikel di dalam matriks.

4.1.2 Kekuatan Tarik

Chufan Xiao, dkk pada tahun 2018 telah melakukan penelitian mengenai material nanokomposit berbasis polimer epoksi yang diperkuat oleh nanopartikel. Penelitian tersebut menganalisis pengaruh kadar penambahan dan perlakuan partikel nanosilika (SiO_2) pada kadar 0, 1, 2, 3, dan 4% terhadap sifat mekanik material nanokomposit terutama pada sifat Tarik dari nanokomposit. Pengujian dilakukan menggunakan CMT 5105 *electronic universal testing machine* pada kecepatan 5 mm/menit sesuai dengan standar ASTM D638-2014, dan modulus elastisitas sampel diukur menggunakan ekstensometer elektronik. Pada penelitian yang dilakukan oleh Fang Liu, dkk pada tahun 2017 mengenai material nanokomposit berbasis polimer epoksi digunakan kadar penambahan nanosilika yang berbeda yaitu pada 0 dan 10% dengan alat pengujian Kekuatan tarik yaitu Instron 5567 *universal testing machine.* Sedangkan, pada penelitian yang dilakukan oleh Dan M. Constantinescu, dkk pada tahun 2017 digunakan kadar penambahan nanosilika pada 0, 0.3, 1, dan 3% dengan pengujian traksi uniaksial dari spesimen menggunakan mesin uji Zwick/Roell, model Z010, dengan kekuatan maksimum 10 kN. Spesimen sesuai dengan ISO 527-2 tipe 1A dengan regangan diukur menggunakan ekstensometer Epsilon. Kecepatan pengujian yang digunakan adalah 1,5 mm/menit. Data hasil pengujian dari jurnal tersebut ditampilkan pada tabel 4.1 mengenai peningkatan nilai Sifat Tarik epoksi/nanosilika.

Tabel 4.1 Sifat tarik nanokomposit epoksi/nanosilika

Nanopartikel	Kadar (%)	Kekuatan tarik (MPa)	Perubahan nilai Kekuatan Tarik (%)	Referensi
Nanosilika	0	37.62	0	(Xiao, dkk, 2018)
	1	53.16	41.31	
	2	62.03	64.89	
	3	64.75	72.12	
	4	57.59	53.08	

0	65.80	0	(Liu dkk, 2017)
10	69.00	4.86	
0	71.37	0	(Constantinescu dkk, 2017)
0.3	83.02	16.32	
1	85.74	20.13	
3	85.02	19.13	

Dapat dilihat pada Tabel 4.1 (Xiao, dkk, 2018) telah dilakukan analisis mengenai pengaruh nanopartikel terhadap sifat mekanik material nanokomposit Epoksi/Nanosilika. pada kadar tertentu terutama pada Kekuatan tarik. Pengujian Tarik pada nanokomposit yang diperkuat nanosilika menunjukkan hasil yang sangat baik dengan terjadinya peningkatan nilai kekuatan tarik optimum mencapai 72.12% pada penambahan partikel dengan kadar 3%. Penambahan partikel pada kadar diatas 3% akan meyebabkan turunnya nilai kekuatan tarik secara signifikan dari nilai sebelumnya yaitu sebesar 19.03% keatas. Pada penelitian yang telah dilakukan oleh Fang Liu, dkk pada tahun 2017 pada penambahan nanosilika pada kadar 10% terjadi peningkatan kekuatan tarik optimum sebesar 4.86%. sedangkan, pada penelitian yang dilakukan oleh Dan M. Constantinescu, dkk pada tahun 2017 menunjukkan peningkatan nilai yang cukup baik pada penambahan 1% nanosilika yaitu sebesar 20.13% dan mengalami penurunan nilai pada penambahan diatas 1% nanosilika. Hal ini menunjukkan bahwa secara umum adanya keterbatasan kadar optimum dari penambahan partikel Nanosilika dalam nanokomposit yang mempengaruhi peningkatan nilai kekuatan tarik pada kadar 1-3% yang dimana pada kadar tersebut nanosilika dapat terdispersi dengan baik serta meyebar lebih seragam pada material polimer epoksi. Sedangkan, pada kadar diatas 3% akan terdapat lebih banyak *micro crack* yang terjadi pada material akibat dari dispersi yang kurang baik sehingga mengakibatkan peningkatan kekuatan tarik tidak terjadi begitu signifikan atau bisa jadi dapat menurun.

4.1.3 Kekuatan Tekan

Fang Liu, dkk pada tahun 2017 juga telah melakukan penelitian mengenai sintesis dan manufaktur material nanokomposit berbasis polimer Epoksi. Pada penelitiannya tersebut, dianalisis pengaruh kadar penambahan partikel nanosilika (SiO_2) terhadap sifat mekanik material nanokomposit terutama pada Kekuatan tekan. Penambahan nanopartikel yang dilakukan yaitu pada kadar 0, 2, 4, 6, 8, dan 10% pada matriks polimer epoksi. Pada penelitian ini, pengujian Kekuatan tekan dilakukan menggunakan alat uji Instron 5567 *universal testing machine* dengan standar pengujian berdasarkan kepada ASTM D695 dan kecepatan *cross-head* adalah 1,3 mm/menit. Hasil pengujian kekuatan tekan ditunjukkan pada tabel 4.2 yang menunjukkan peningkatan nilai sifat tekan material epoksi/nanosilika.

Tabel 4.2 Sifat tekan nanokomposit epoksi/nanosilika

Nanopartikel	Kadar (%)	Kekuatan Tekan (MPa)	Perubahan nilai Kekuatan Tekan(%)	Referensi
Nanosilika	0	89.1	0	(Liu dkk, 2017)
	2	91.6	2.81	
	4	91.5	2.69	
	6	91.9	3.14	
	8	92.3	3.59	
	10	91.1	2.24	

Dapat dilihat pada Tabel 4.2 Fang Liu, dkk pada tahun 2017 telah menganalisis mengenai pengaruh nanopartikel terhadap sifat mekanik material nanokomposit Epoksi/Nanosilika terutama pada kekuatan tekan. Pengujian Tekan pada nanokomposit yang diperkuat nanosilika menunjukkan hasil yang tidak begitu baik yaitu dengan terjadinya peningkatan nilai kekuatan tekan optimum hanya mencapai 3.59% pada penambahan partikel dengan kadar 8%. Penambahan partikel pada kadar diatas 8% akan meyebabkan turunnya nilai kekuatan tekan yang kurang signifikan dari nilai

sebelumnya yaitu sebesar 1.35% keatas. hal ini menunjukkan bahwa adanya keterbatasan kadar optimum penambahan partikel Nanosilika dalam nanokomposit yang mempengaruhi peningkatan nilai kekuatan tekan pada kadar 8% akibat dari perilaku dispersi dari nanopartikel. Nilai yang fluktuatif dari kekuatan tekan bisa disebabkan oleh cacat yang dihasilkan selama proses fabrikasi. Ditemukan bahwa ketika partikel nano dimasukkan ke dalam jenis matriks getas, senyawa menjadi sangat lengket, sehingga sulit untuk menyeragamkan partikel nano yang terdispersi dalam matriks dan menghilangkan *bubble* yang ada.

4.1.4 Kekuatan Lentur

Chufan Xiao, dkk pada tahun 2018 telah melakukan penelitian mengenai material nanokomposit berbasis polimer Epoksi. Hasil dari penelitian tersebut adalah analisis pengaruh penambahan partikel nanosilika (SiO_2) pada kadar 0, 1, 2, 3, dan 4% terhadap sifat mekanik material nanokomposit terutama pada sifat Lentur. Pengujian dilakukan dengan menggunakan CMT 5105 electronic universal testing machine dengan prinsip pengujian *Three-Point Bending* sesuai dengan standar uji ASTM D790-2015, dimana kecepatan tekukan yang digunakan adalah pada 2 mm/menit. Hasil pengujian kekuatan lentur seperti pada data yang ditunjukkan oleh Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Sifat lentur nanokomposit epoksi/nanosilika

Nanopartikel	Kadar (%)	Kekuatan lentur (MPa)	Perubahan nilai Kekuatan Lentur(%)	Referensi
Nanosilika	0	59.2	0	(Xiao dkk, 2018)
	1	62.1	4.90	
	2	67.6	14.19	
	3	85.9	45.10	
	4	60	1.35	

Dapat dilihat pada Tabel 4.3 Chufan Xiao, dkk pada tahun 2018 telah melakukan analisis mengenai pengaruh nanopartikel terhadap sifat mekanik material nanokomposit Epoksi/Nanosilika pada kadar tertentu terutama pada kekuatan lentur. Pengujian Lentur pada nanokomposit yang diperkuat nanosilika menunjukkan hasil yang cukup baik dengan terjadinya peningkatan nilai kekuatan lentur optimum mencapai 45.10% pada penambahan partikel dengan kadar 3%. Penambahan partikel pada kadar diatas 3% akan meyebabkan turunnya nilai kekuatan lentur yang cukup signifikan dari nilai sebelumnya yaitu sebesar 43.75% keatas. hal ini menunjukkan bahwa adanya keterbatasan kadar optimum pada penambahan partikel nanosilika dalam nanokomposit yang mempengaruhi peningkatan nilai kekuatan lentur pada kadar 3%. Akibat dari kemampuan dispersi dari nanopartikel dalam matriks polimer epoksi.

4.1.5 Analisi Jurnal

Jurnal yang telah ditinjau yaitu material nanosilika dengan ukuran pada rentang 5 - 20 nm. penelitian yang dilakukan oleh Chufan Xiao, dkk pada tahun 2018 dan oleh Fang Liu, dkk pada tahun 2017 mengenai pengaruh partikel nanosilika terhadap morfologi dan sifat mekanik dari nanokomposit polimer epoksi menunjukkan bahwa secara umum penambahan partikel nanosilika akan berdampak baik (terutama pada ukuran yang lebih kecil). meskipun, terdapat beberapa perbedaan cukup signifikan dari proses manufaktur yang dilakukan. Hal ini ditunjukkan oleh meningkatnya kekasaran permukaan dan *mechanical adhesion* antara partikel dan polimer epoksi yang berakibat pada peningkatan kekuatan sifat mekanik nanokomposit terutama dalam Kekuatan tarik, Kekuatan tekan, dan Kekuatan lentur.

Catatan penting dalam tinjauan jurnal mengenai nanokomposit epoksi/Nanosilika juga telah dianalsis seperti pada jurnal yang diteliti oleh Fang Liu, dkk pada tahun 2017 mengenai pengaruh partikel nanosilika terhadap morfologi dan sifat mekanik dari nanokomposit polimer epoksi. Beberapa data yang anomali

terdapat pada hasil pengujiannya seperti yang ditunjukkan pada tabel sifat kekuatan tekan yang fluktuatif dan kurang komprehensif. Hal yang sama juga ditemukan pada data pengujian kekuatan tarik epoksi/nanosilika yang hanya menggunakan variable 0% dan 10%, dimana data tersebut kurang menggambarkan dari peningkatan atau pengaruh nanopartikel terhadap polimer epoksi sehingga menyulitkan dalam proses analisis jurnalnya. Jurnal juga tidak menampilkan data SEM atapun dijelaskan mengenai morfologi dari patahan material nanokomposit epoksi/nanosilika. Penelitian yang diteliti oleh Chufan Xiao, dkk pada tahun 2018 yang juga membahas mengenai pengaruh partikel nanosilika terhadap morfologi dan sifat mekanik dari nanokomposit polimer epoksi. Pada jurnal, terdapat bebrapa kekurangan dimana partikel nanosilika yang digunakan tidak dijelaskan secara detail tipe dan karakteristiknya sehingga memungkinkan dapat terjadinya sedikit *error* atau kekeliruan dalam analisis tinjuan jurnal. Sayangnya, dalam hal tersebut tidak diberikan alasan ataupun solusi dari peneliti terkait.

4.2 Epoksi/Halloysite

Ravichandran, dkk pada tahun 2019 telah melakukan penelitian mengenai material nanokomposit berbasis polimer. Material yang digunakan adalah Halloysite nanotubes yang diproduksi oleh Sigma Aldrich Company, Bengaluru, India. Diameter dan panjang dari halloysite masing-masing memiliki kisaran 30 dan 70 nm dan 1–15 μm. Morfologi HNT memiliki struktur seperti tabung dengan densitas sebesar 2,53 g/cm^3 dan luas permukaan sekitar 65 m^2/g. Matriks yang digunakan adalah polimer epoksi lapox L-12. Pada penelitian yang dilakuan oleh Fang Liu, dkk pada tahun 2017 material yang digunakan adalah resin epoksi DGEBA yang diproduksi oleh Araldite-F, Huntsman. *Hardener* yang digunakan yaitu piperidine yang diproduksi oleh Sigma–Aldrich, Australia dengan rasio 100:5 berdasarkan berat. Partikel halloysite yang digunakan diproduksi oleh Imerys Tableware New Zealand Limited. Partikel halloysite yang

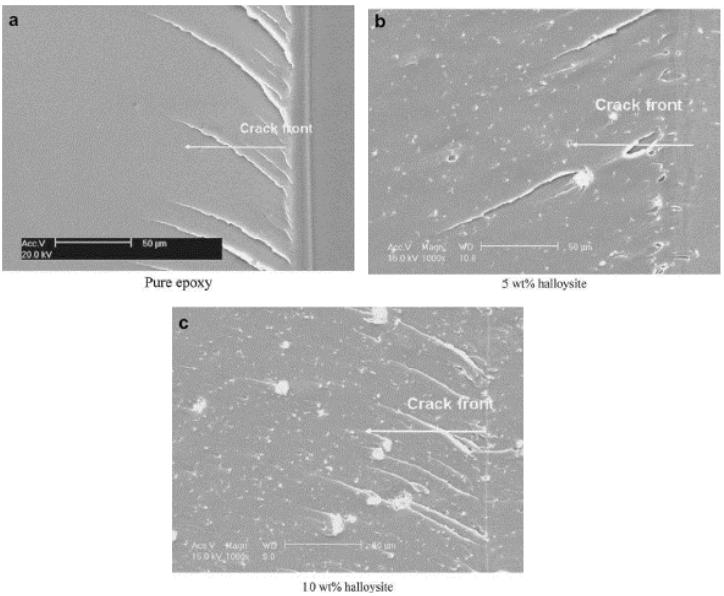
digunakan dalam penelitian ini berbentuk tabung dengan panjang 100-500 nm dan diameter sekitar 10-50nm. Pada penelitian yang dilakukan oleh Shiqiang Deng, dkk pada tahun 2008 material yang digunakan adalah Partikel Halloysite (Imerys Tableware New Zealand Limited) dalam 5% berat dan 10% berat dikombinasikan secara terpisah dengan resin epoksi diglycidyl ether bisphenol A (DGEBA) yang diproduksi oleh Araldite-F (Ciba-Geigy, Australia).

Proses manufaktur yang dilakukan pada penelitian Ravichandran, dkk pada tahun 2019 adalah dengan pencampuran partikel Halloysite ke dalam polimer epoksi. Kemudian, dilakukan sonikasi selama 1 jam untuk meningkatkan kemampuan disperse dari halloysite dalam epoksi. Setelah itu, campuran didegradasi dalam oven vakum selama 10 menit untuk menghilangkan udara yang terperangkap. *Curing agent* yang digunakan adalah K6 *hardener*. *Hardener* ditambahkan dengan perbandingan epoksi dan *hardener* adalah 100:10. Selanjutnya, dilakukan pengadukan selama 10-15 menit. Lalu, campuran dituangkan kedalam cetakan aluminium. Proses manufaktur yang dilakukan oleh Fang Liu, dkk pada tahun 2017 adalah dengan pencampuran matriks epoksi DGEBA dengan partikel Halloysite. Pengadukan dilakukan menggunakan *mechanical mixer* pada temperatur 80℃ selama 1 jam. Setelah itu, campuran ditambahkan dengan *hardener* pada perbandingan 100:5 berdasarkan berat dan diaduk kembali selama 5 menit. *bubble* dihilangkan pada komposit menggunakan oven vakum (sekitar -100 KPa) selama sekitar 30 menit. Proses curing dilakukan di dalam mold *silicon rubber* pada temperatur 80℃ selama 16 jam. Sedangkan pada proses manufaktur yang dilakukan oleh Shiqiang Deng, dkk pada tahun 2008 tidak jauh berbeda dengan yang dilakukan oleh Fang Liu, dkk yaitu nanopartikel halloysite dilakukan pencucian menggunakan aseton. Kemudian, dicampur dengan epoksi araldite-F menggunakan *mechanical mixer*. Setelah itu, *hardener* piperidine (Sigma-Aldrich, Australia) ditambahkan pada kadar perbandingan berat 100:5. Campuran kemudian di degradasi di dalam oven vakum (sekitar -100 kPa)

pada temperatur 100℃ selama 30 menit. Tahap terakhir adalah penuangan campuran kedalam cetakan *silicon rubber* pada temperatur 100℃ selama 16 jam.

4.2.1 Morfologi

Morfologi material nanokomposit yang diperkuat oleh Halloysite juga telah diteliti oleh Shiqiang Deng, dkk pada tahun 2008 melalui pengujian *scanning electron microscopy* (SEM, Philips XL30) dan homogenitasnya pada matriks polimer epoksi. Pengamatan dilakukan pada permukaan patah material dengan penambahan nanopartikel Halloysite pada kadar 0, 5, dan 10%. Perbesaran yang dilakukan dalam pengujian adalah pada perbesaran 1000x yang ditunjukkan pada gambar 4.2



Gambar 4.2 Hasil Pengujian SEM material nanokomposit yang diperkuat Halloysite (a) tanpa penambahan (b) penambahan 5% (c) penambahan 10%
(Deng dkk, 2008)

Partikel halloysite ditunjukkan oleh warna cerah atau flek putih pada gambar SEM yang tersebar cukup seragam di seluruh bagian material polimer epoksi. Partikel halloysite dapat mengadopsi berbagai morfologi, tetapi bentuk yang paling umum adalah struktur tubular berongga memanjang dengan besar rasio aspek mirip dengan CNT, akibat dari cacat strukturalnya, terutama pada susun lapisan alumina dan lapisan silika, dan air yang terhidrasi. Warna cerah atau flek putih pada gambar SEM semakin banyak terlihat seiring dengan penambahan dari partikel Halloysite. Dapat dilihat juga bahwa terjadi tegangan permukaan di beberapa titik namun tampak kurang jelas antara partikel dan permukaan polimer epoksi melalui sudut-sudut yang terbentuk pada permukaan material seiring dengan penambahan kadar tertentu dari Halloysite yang terjadi pada material nanokomposit berpenguat partikel seperti yang ditunjukkan pada gambar.

Pada hasil pengujian SEM, morfologi dari permukaan material nanokomposit yang diperkuat nanopartikel Halloysite tersebar cukup seragam – meskipun sebagian besar dalam bentuk cluster partikel dengan ukuran yang cukup besar – pada material polimer epoksi yang menandakan cukup baiknya sifat ketercampuran material Halloysite dalam polimer epoksi. Pada gambar dapat dilihat bahwa disepersi halloysite pada polimer epoksi tidak cukup homogen pada skala nano karena keberadaan cluster partikel. Jika cluster ini terlalu besar maka cenderung akan tenggelam ke dalam matriks yang mengarah kepada inhomogeneity *cross-thickness* yang signifikan dan dapat menurunkan sifat mekanik material nanokomposit.

Halloysite pada nanokomposit membentuk *mechanical inter-lock* dengan bentuk cluster partikel sehingga menyebabkan peningkatan *mechanical adhesion* namun tidak terlalu kuat antara matriks dan penguat. Hal ini didukung oleh hasil pengujian SEM yang menunjukkan terjadinya peningkatan kekasaran dan tegangan permukaan seiring dengan penambahan nanopartikel pada kadar yang ditentukan. Sehingga dapat dikatakan bahwa dengan adanya peningkatan pada *mechanical adhesion* maka, sifat mekanik pada

nanokomposit juga akan mengalami peningkatan secara signifikan akibat dari sifat dan karakteristik yang diberikan oleh partikel halloysite pada kadar yang tepat dan situasi distribusi yang baik dari nanopartikel di dalam matriks.

4.2.2 Kekuatan Tarik

Ravichandran, dkk pada tahun 2019 telah melakukan penelitian mengenai pengaruh kadar penambahan nano partikel halloysite pada kadar 0, 1, 2, 3, dan 4% terhadap sifat mekanik material nanokomposit yang diperkuat oleh partikel halloysite terutama pada sifat tarik dari nanokomposit. spesimen disiapkan sesuai standar ASTM D3039 dengan penampang spesimen 150 mm × 12 mm × 3 mm dengan *gauge length* 120 mm. Alat pengujian yang digunakan adalah *universal tensile testing machine* (UTM) (Kalpak Make, kapasitas 100 kN) dengan kecepatan crosshead yaitu 5 mm/menit. Fang Liu, dkk dan Shiqiang Deng, dkk pada tahun 2017 juga telah melakukan penelitian mengenai material nanokomposit berbasis polimer epoksi pada kadar penambahan halloysite yang berbeda yaitu 0, 5, dan 10%. Pengujian dilakukan dengan menggunakan Instron 5567 *universal testing machine* sesuai standar ASTM D638-99 dengan penampang 13 mm x 5 mm di wilayah panjang *gauge*. Ekstensometer dengan panjang pengukur 50 mm dipasang pada permukaan spesimen untuk menentukan regangan aksial. Laju pemuatan sebesar 1 mm/menit digunakan. Data hasil pengujian dari jurnal tersebut ditampilkan pada Tabel 4.4 mengenai peningkatan nilai Sifat Tarik epoksi/halloysite.

Tabel 4.4 Sifat Tarik nanokomposit epoksi/halloysite

Nanopartikel	Kadar (%)	Kekuatan Tarik (MPa)	Perubahan nilai Kekuatan Tarik (%)	Referensi
Halloysite	0	191.4	0	(Ravichandran dkk, 2019)
	1	234	22.26	
	2	248.4	29.78	

3	267.7	39.86	
4	257.8	34.69	
0	65.80	0	(Liu dkk, 2017)
5	68.10	3.50	
10	68.20	3.65	
0	62.60	0	(Deng dkk, 2017)
5	67.30	7.50	
10	67.40	7.67	

Dapat dilihat pada Tabel 4.4 Ravichandran, dkk pada tahun 2019 telah melakukan analisis mengenai pengaruh nanopartikel terhadap sifat mekanik material nanokomposit epoksi/halloysite. Penelitian dilakukan pada kadar tertentu terutama pada Kekuatan tarik. Pengujian tarik pada nanokomposit yang diperkuat Halloysite menunjukkan hasil yang cukup baik dengan terjadinya peningkatan nilai kekuatan tarik optimum mencapai 39.86% pada penambahan partikel dengan kadar 3%. Penambahan partikel pada kadar diatas 3% akan meyebabkan turunnya nilai kekuatan tarik dari nilai sebelumnya hingga mencapai sebesar 5.17% keatas. Sedangkan pada penelitian yang telah dilakukan oleh Fang Liu, dkk pada tahun 2017 dan Shiqian Deng, dkk pada tahun 2008 tidak menunjukkan banyak perbedaan yaitu pada penambahan halloysite pada kadar 10% terjadi peningkatan kekuatan tarik optimum sekitar 3.65%. Hal ini menunjukkan bahwa adanya keterbatasan kadar optimum dari penambahan nanopartikel Halloysite dalam nanokomposit yang mempengaruhi peningkatan nilai kekuatan tarik paling baik pada kadar 3%. Peningkatan nilai kekuatan tarik dari nanokomposit disebabkan oleh kemampuan dispersi yang baik dari halloysite kedalam polimer epoksi sehingga meningkatkan kekuatan antar muka dan adhesi statisnya pada kadar optimum yang merupakan transfer deformasi elastis sampai batas tertentu. Hal ini juga disebabkan karena pembatasan mobilitas dan deformabilitas epoksi serta pembentukan *ordered exfoliation* dari rantai polimer di antara jarak interstitial halloysite. Sedangkan, pada penambahan kadar diatas 3% peningkatan tidak terjadi secara signifikan atau terjadi penurunan nilai kekuatan tarik karena

agregasi halloysite di seluruh matriks epoksi yang meningkatkan pembentukan titik-titik konsentrasi.

4.2.3 Kekuatan Tekan

Fang Liu, dkk pada tahun 2017 telah melakukan penelitian mengenai material nanokomposit berbasis polimer Epoksi. Penelitian tersebut menganalisis pengaruh kadar penambahan Halloysite *nanotubes* terhadap sifat mekanik material nanokomposit. Penambahan nanopartikel dilakukan dengan kadar 0, 2, 5, 7, 10, dan 15% pada matriks polimer epoksi. Pada penelitiannya, pengujian dilakukan menggunakan alat uji Instron 5567 *universal testing machine* dengan standar pengujian yaitu ASTM D695 dengan kecepatan *cross-head* adalah 1,3 mm/menit. Hasil pengujian dan peningkatan nilai dari kekuatan tekan material nanokomposit yang diperkuat nanopartikel halloysite ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Sifat Tekan nanokomposit epoksi/halloysite

Nanopartikel	Kadar (%)	Kekuatan Tekan (MPa)	Perubahan nilai Kekuatan Tekan (%)	Referensi
Halloysite	0	89.1	0	(Liu dkk, 2017)
	2	90.8	1.91	
	5	89.3	0.22	
	7	90.9	2.02	
	10	90.4	1.46	

Dapat dilihat pada Tabel 4.5 Fang Liu, dkk pada tahun 2017 telah melakukan analisis mengenai pengaruh nanopartikel terhadap sifat mekanik material nanokomposit Epoksi/Halloysite pada kadar tertentu terutama pada kekuatan tekan. Pengujian Tekan pada nanokomposit yang diperkuat Halloysite menunjukkan hasil yang kurang begitu baik dengan terjadinya peningkatan nilai kekuatan tekan optimum hanya mencapai 2.02% pada penambahan partikel dengan kadar 7%. Penambahan partikel pada kadar diatas 7% akan

meyebabkan turunnya nilai kekuatan tekan dari nilai sebelumnya hingga mencapai sebesar 0.56% keatas. hal ini menunjukkan bahwa adanya keterbatasan kadar optimum penambahan nanopartikel Halloysite dalam nanokomposit yang mempengaruhi peningkatan nilai kekuatan tekan pada kadar 7%. Nilai kekuatan tekan yang fluktuasi bisa disebabkan oleh cacat yang dihasilkan selama proses fabrikasi. Ditemukan bahwa ketika partikel nano dimasukkan ke dalam jenis matriks getas, senyawa menjadi sangat lengket, sehingga sulit untuk menyeragamkan partikel nano yang terdispersi dalam matriks dan menghilangkan *bubble* yang ada.

4.2.4 Kekuatan Lentur

Ravichandran, dkk pada tahun 2019 telah melakukan penelitian mengenai pengaruh kadar penambahan nanopartikel halloysite pada kadar 0, 1, 2, 3, dan 4% terhadap sifat mekanik material nanokomposit terutama pada sifat Lentur. Kekuatan lentur diukur pada suhu kamar sesuai dengan standar ASTM D790 dengan ukuran spesimen penampang yaitu 90mm × 12mm × 3mm menggunakan *Universal testing machine* UTM (Kalpak Make, kapasitas 100 kN). Panjang *gauge* pada pengujian sebesar 60 mm dengan laju deformasi 2,5 mm/menit. Pada tahun 2008 Shiqiang Deng, dkk juga telah melakukan penelitian yang sama dengan alat pengujian menggunakan *universal material testing machine* (Instron 5567) dengan dimensi spesimen yaitu 60 mm x10 mm x 4 mm. Panjang *gauge* sebesar 48 mm dan laju pemuatan yaitu 3 mm/menit. Hasil pengujian dan peningkatan nilai dari kekuatan lentur seperti pada data yang ditunjukkan oleh Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Sifat Lentur nanokomposit epoksi/halloysite

Nanopartikel	Kadar (%)	Kekuatan Lentur (MPa)	Perubahan nilai Kekuatan Lentur (%)	Referensi
Halloysite	0	307.4	0	(Ravichandran dkk, 2019)
	1	414.3	34.78	

2	434.5	41.35	
3	489.4	59.21	
4	446.3	45.19	
0	111.0	0	
5	116.0	4.50	(Liu dkk, 2017)
10	120.3	8.37	

Dapat dilihat pada Tabel 4.6 Ravichandran, dkk pada tahun 2019 telah melakukan analisis mengenai pengaruh nanopartikel terhadap sifat mekanik material nanokomposit epoksi/halloysite pada kadar tertentu terutama pada Kekuatan lentur. Pengujian Lentur pada nanokomposit yang diperkuat Halloysite menunjukkan hasil yang sangat baik dengan terjadinya peningkatan nilai Kekuatan lentur optimum mencapai 59.21% pada penambahan partikel dengan kadar 3%. Penambahan partikel pada kadar diatas 3% akan meyebabkan turunnya nilai Kekuatan lentur dari nilai sebelumnya hingga mencapai sebesar 14.02% keatas. Sedangkan, pada penelitian yang dilakukan oleh Shiqiang Deng, dkk pada tahun 2008 menunjukkan peningkatan yang terjadi pada penambahan nanopartikel halloysite paling optimum pada kadar 10% yaitu mencapai peningkatan sebesar 8.38%. Hal ini menunjukkan bahwa adanya keterbatasan kadar optimum penambahan nanopartikel Halloysite dalam nanokomposit yang mempengaruhi peningkatan nilai Kekuatan lentur paling baik pada kadar 3%. Hal ini disebabkan oleh karakteristik unik yang diberikan oleh partikel halloysite. Disepersi yang baik menghasilkan ikatan antar muka yang kuat antara Halloysite dan polimer epoksi. Sedangkan pada penambahan kadar diatas 3% peningkatan terjadi tidak signifikan atau dapat terjadi penurunan nilai kekuatan lentur karena melemahnya interaksi partikel ke partikel, kekosongan, dan dispersi serta agregasi halloysite yang buruk dalam matriks polimer epoksi.

4.2.5 Analisis Jurnal

Jurnal yang telah ditinjau yaitu partikel halloysite dengan ukuran pada rentang 10 – 70 nm. Penelitian yang dilakukan oleh

Ravichandran, dkk pada tahun 2019, Fang Liu, dkk pada tahun 2017, dan Shiqiang Deng, dkk pada tahun 2008 mengenai pengaruh partikel halloysite terhadap morfologi dan sifat mekanik dari nanokomposit polimer epoksi menunjukkan bahwa secara umum pada penambahan partikel halloysite akan berdampak baik. Peningkatan yang kurang optimal diakibatkan dari ukuran partikel yang cukup besar dan dalam proses manufakturnya ditemui beberapa perbedaan. Peningkatan tersebut ditunjukkan oleh peningkatan kekasaran permukaan dan *mechanical adhesion* antara partikel dan polimer epoksi yang berakibat pada peningkatan kekuatan sifat mekanik nanokomposit terutama dalam Kekuatan tarik, Kekuatan tekan, dan Kekuatan lentur.

Catatan penting dalam tinjauan jurnal mengenai nanokomposit epoksi/halloysite juga telah dianalsis. Jurnal yang diteliti yaitu oleh Fang Liu, dkk pada tahun 2017 mengenai pengaruh partikel halloysite terhadap morfologi dan sifat mekanik dari nanokomposit polimer epoksi. Beberapa data yang anomali terdapat pada hasil pengujiannya seperti yang ditunjukkan pada tabel sifat kekuatan tekan yang fluktuatif dan beberapa data yang ditunjukkan kurang komprehensif seperti halnya pada data pengujian kekuatan tarik epoksi/halloysite yang hanya menggunakan variable pada 0%, 5%, dan 10% yang dimana data tersebut kurang menggambarkan dari peningkatan atau pengaruh nanopartikel terhadap polimer epoksi sehingga menyulitkan dalam analisis pengaruhnya. Hal tersebut juga dapat ditemui dalam jurnal yang diteliti oleh Shiqiang Deng, dkk pada tahun 2008. Pada penelitian yang dilakukan oleh Ravichandran, dkk pada tahun 2019, terdapat beberapa kekurangan diantaranya adalah pada material epoksi yang digunakan tidak diebutkan karakteristik dan pabrikasinya sehingga dapat terjadi sedikit *error* atau kekeliruan dalam analisis tinjuan jurnal. Sayangnya, dalam hal tersebut tidak diberikan alasan ataupun solusi terkait dari peneliti.

4.3 Epoksi/Montmorillonite *Nanoclay*

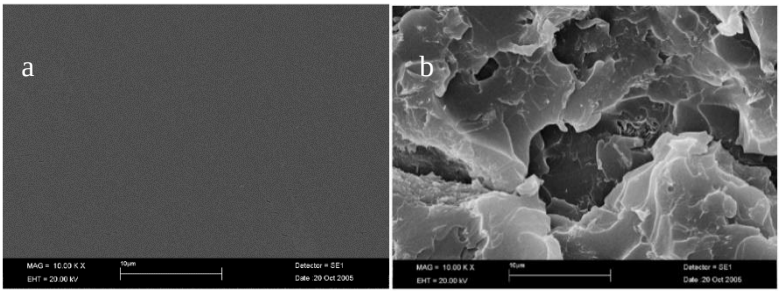
Penelitian yang dilakukan oleh Man-Wai Ho, dkk pada tahun 2006 menggunakan material resin polimer epoksi dengan tipe Araldite GY 251 jenis Bisphenol A dan *hardener* dengan viskositas rendah jenis alifatik yaitu HY 956. Material tersebut diproduksi oleh Ciba-Geigy AG, Swiss. Montmorillonite *nanoclay* yang digunakan berukuran 200 nm dan diproduksi oleh Southern Clay Product Garami te 1958. Penelitian yang dilakukan oleh Aidah Jumahat, dkk pada tahun 2012 menggunakan material resin polimer epoksi Epikote 828 (DGEBA) dengan *hardener* HY906 yang merupakan *hardener* tipe 1-metil-5-norbornena-2,3-dicarboxylic anhydride (NMA) dengan akselerator DY062 dan Benzyldimethylamine (BDMA). Montmorillonite *nanoclay* yang digunakan berukuran dry particle 8 – 10 µm yang akan diproses menjadi nano hingga pada ukuran 2.4 – 8 nm. Sedangkan, penelitian yang dilakukan oleh Zyad salem alsagayar, dkk pada tahun 2015 material yang digunakan adalah Montmorillonite *nanoclay* cloisite 30B yang diproduksi oleh Southern Clay Products. DER 331 Resin epoksi yang terdiri dari epichlorohydrin dan bisphenol-A (DGEBA) dengan nilai epoksida 23% dan berat epoksida 190 g/equiv serta *hardener* amina sikloalifatik yang dimodifikasi, JOINTMINE 905-3S, dengan nilai Amine 300 mgKOH/g yang diproduksi oleh Dow Chemical Pacific Singapore.

Proses manufaktur yang dilakukan pada penelitian oleh Man-Wai Ho, dkk pada tahun 2006 adalah pencampuran polimer epoksi dengan Montmorillonite *nanoclay* yang kemudian dilakukan *mechanical mixing* pada 500 rpm selama 1 jam. Setelah itu, campuran dipanaskan pada 50 ℃ untuk menurunkan viskositas kemudian di vakum untuk menghilangkan *bubble* yang terperangkap dan ditambahkan dengan *hardener*. Proses akhir adalah penuangan campuran kedalam cetakan pengujian dan *curing* selama 12 jam dan di diamkan selama 1 minggu. Pada penelitian Aidah Jumahat, dkk pada tahun 2012 proses manufaktur dilakukan dengan cara pengeringan terlebih dahulu terhadap Montmorillonite *nanoclay* selama 24 jam pada temperatur 60 ℃

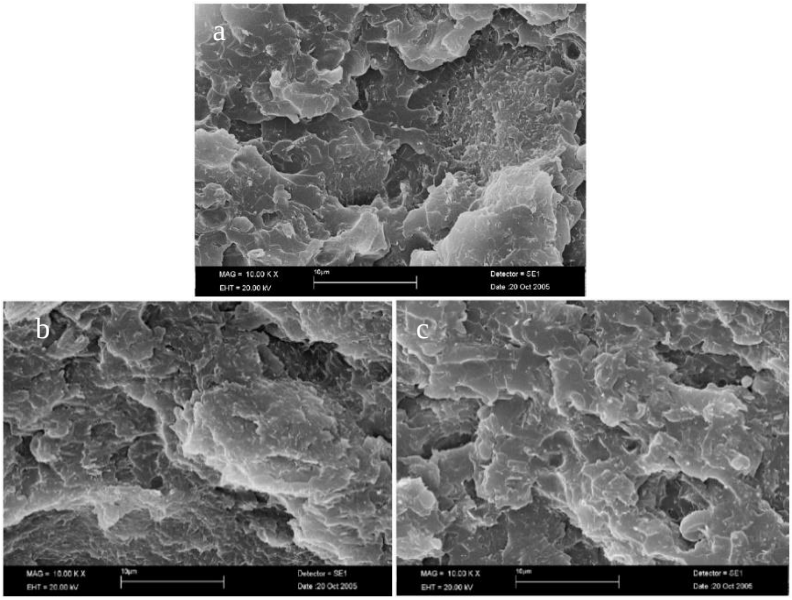
dalam vakum. Resin epoksi di *pre-heat* pada temperatur 80 ℃ untuk menurunkan viskositasnya kemudian dicampurkan dengan nanopartikel dan dilakukan proses *mechanical mixing* pada 400 rpm pada rendaman minyak panas 80 ℃ selama 2 jam. Selanjutnya, campuran didegradasi dalam oven vakum pada temperatur 80 ℃ selama 15 menit untuk menghilangkan *bubble* yang terperangkap dan kemudian ditambahkan dengan *hardener* NMA dan akselerator BDMA. Tahap akhir proses adalah penuangan campuran ke dalam cetakan silicon yang dilapisi dengan *release agent* dan Kembali di degredasi Kembali dalam oven vakum kemudian proses *pre-curing* pada 80 ℃ selama 2 jam, *curing* pada 120 ℃ selama 3 jam, dan *post-curing* pada 150 ℃ selama 4 jam. Sedangkan, pada penelitian oleh Zyad salem alsagayar, dkk pada tahun 2015 proses manufaktur dilakukan dengan cara yaitu nanopartikel sebanyak 1-gram disonikasi dalam aseton selama 2 jam dengan konsentrasi larutan sekitar 50 ml. Setelah proses sonikasi, campuran ditambahkan kedalam resin polimer epoksi pada temperatur 80 ℃ dan dilakukan *mechanical mixing* pada 400 rpm selama beberapa jam hingga aseton hilang. Aseton yang tersisa dihilangkan dengan vakum pada 55 ℃ selama 20 menit. Lalu, *hardener* ditambahkan ke dalam campuran yang diikuti dengan proses *curing* 110 ℃ selama 2 jam dalam cetakan.

4.3.1 Morfologi

Morfologi material nanokomposit yang diperkuat oleh montmorillonite *nanoclay* telah diteliti oleh Man-Wai Ho, dkk pada tahun 2006 melalui pengujian SEM pada penambahan nanopartikel dengan kadar 0, 2, 4, 6, dan 8%. Perbesaran yang dilakukan dalam pengujian adalah perbesaran pada 10000x yang ditunjukkan pada gambar 4.3 dan 4.4.



Gambar 4.3 Hasil Pengujian SEM material nanokomposit yang diperkuat *nanoclay* (a) Tanpa penambahan nanopartikel (b) penambahan 2% nanopartikel
(Ho dkk, 2006)



Gambar 4.4 Hasil Pengujian SEM material nanokomposit yang diperkuat *nanoclay* (a) Penambahan 4% nanopartikel (b) penambahan 6% nanopartikel (c) penambahan 8% nanopartikel
(Ho dkk, 2006)

Partikel montmorillonite *nanoclay* ditunjukkan oleh warna cerah atau flek putih pada gambar SEM yang tersebar seragam di seluruh bagian material polimer epoksi. Warna cerah atau flek putih pada gambar SEM semakin banyak terlihat seiring dengan penambahan dari partikel Montmorillonite *nanoclay*. Dapat dilihat juga bahwa terjadi tegangan permukaan di beberapa titik yang tampak jelas antara partikel dan permukaan polimer epoksi melalui sudut-sudut yang terbentuk pada permukaan material seiring dengan penambahan kadar tertentu dari Montmorillonite *nanoclay* yang terjadi pada material nanokomposit berpenguat partikel seperti yang ditunjukkan pada gambar.

Pada hasil pengujian SEM, dapat diketahui bahwa pada morfologi dari permukaan material nanokomposit yang diperkuat partikel Montmorillonite *nanoclay* tersebar cukup seragam pada material polimer epoksi ditandai dengan adanya *mechanical inter-lock* dan ketercampuran dari material Montmorillonite *nanoclay* yang baik seiring dengan penambahan kadarnya. Pada material polimer epoksi tanpa tambahan nanopartikel menunjukkan permukaan yang mulus dengan hampir tidak terlihat adanya garis tipis ataupun *micro crack* pada material. Penambahan nanopartikel dalam kondisi partikel secara interkalasi menyebabkan permukaan yang berbeda dengan terjadinya peningkatan kekasaran permukaan dan terkadang nanopartikel terlihat keluar dari permukaan patah. Pada penelitiannya Man-Wai Ho, dkk juga menganalisis penambahan nanopartikel pada kadar diluar optimum menyebabkan terjadinya penurunan terhadap sifat mekanik dari nanokomposit akibat dari semakin rapuhnya material dan terbentuknya aglomerasi nanopartikel.

4.3.2 Kekuatan Tarik

Man-Wai Ho, dkk pada tahun 2006 telah melakukan penelitian mengenai material nanokomposit berbasis polimer Epoksi. Penelitian tersebut menganalisis pengaruh kadar penambahan nanopartikel Montmorillonite *nanoclay* pada kadar 0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, dan 8% terhadap sifat mekanik material

nanokomposit terutama pada sifat Kekuatan tarik. Pengujian dilakukan dengan menggunakan MTS machine Alliance RT/50 dengan kecepatan 2 mm/menit. Sedangkan, pada penelitian yang dilakukan oleh Zyad salem alsagayar, dkk pada tahun 2015 digunakan penambahan pada kadar yang berbeda yaitu pada 0, 0.5, 1, 1.5, dan 2%. Hasil pengujian dan peningkatan nilai kekuatan tarik ditunjukkan seperti pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Sifat tarik nanokomposit epoksi/montmorillonite *nanoclay*

Nanopartikel	Kadar (%)	Kekuatan tarik (MPa)	Perubahan nilai Kekuatan Tarik (%)	Referensi
Montmorillonite *nanoclay*	0	43.7	0	(Ho dkk, 2006)
	0.1	44.8	2.52	
	1	45.9	5.03	
	2	43.8	0.23	
	3	45.2	3.43	
	4	46	5.26	
	5	46	5.26	
	6	46	5.26	
	7	43.7	0.00	
	8	42.6	-2.52	
	0	61	0	(Alsagayar dkk, 2015)
	0.5	62	1.64	
	1	63	3.27	
	1.5	48	-21.31	
	2	34	-44.26	

Dapat dilihat pada tabel 4.7 Man-Wai Ho, dkk pada tahun 2006 telah melakukan analisis mengenai pengaruh nanopartikel terhadap sifat mekanik material nanokomposit epoksi/montmorillonite *nanoclay* pada kadar tertentu terutama pada Kekuatan tarik. Pengujian Kekuatan tarik pada nanokomposit yang diperkuat oleh partikel montmorillonite *nanoclay* menunjukkan hasil yang tidak terlalu baik dengan terjadinya peningkatan nilai kekuatan tarik optimum yaitu mencapai 5.26%

pada penambahan partikel dengan kadar 4 – 6 %. Penambahan partikel pada kadar diatas 6% akan meyebabkan terjadinya penurunan nilai kekuatan tarik dari nilai sebelumnya hingga mencapai sebesar 5.26%. Sedangkan, penelitian yang dilakukan oleh Zyad salem alsagayar, dkk pada tahun 2015 penambahan montmorillonite *nanoclay* pada resin polimer epoksi mengakibatkan terjadinya peningkatan nilai kekuatan tarik hingga mencapai 1.19%, pada penambahan 1% nanopartikel. Penambahan diatas 1% mengakibatkan terjadinya penurunan nilai kekuatan tarik hingga mencapai 44.26% pada 2% nanopartikel. Penurunan nilai kekuatan tarik pada nanokomposit disebabkan oleh dispersi yang kurang baik dan aglomerasi yang terjadi antar partikel montmorillonite *nanoclay* seiring dengan penambahan kadarnya serta adanya peningkatan nilai viskositas yang menyebabkan terbentuknya banyak *air-traps* dan *micro void*. Hal ini menunjukkan bahwa adanya keterbatasan kadar optimum penambahan nanopartikel montmorillonite *nanoclay* dalam nanokomposit yang mempengaruhi peningkatan nilai kekuatan tarik pada kadar 1 – 6 %.

4.3.3 Kekuatan Tekan

Aidah Jumahat, dkk pada tahun 2012 telah melakukan penelitian mengenai material nanokomposit berbasis polimer epoksi. Penelitian tersebut menganalisis pengaruh kadar penambahan nanopartikel Montmorillonite *nanoclay* pada kadar 0, 1, 3, dan 5% dengan bentuk spesimen yang berbeda-beda terhadap sifat mekanik material nanokomposit terutama pada sifat *Kekuatan tekan*. Pengujian dilakukan dengan menggunakan standar ASTM D695-96 dengan dimensi spesimen yaitu 12.5 mm x 12.5 mm x 25.4 mm. alat pengujian yang digunakan adalah Hounsfield universal testing machine dengan kecepatan crosshead yaitu 1 mm/menit. Hasil pengujian dan peningkatan nilai kekuatan tekan ditunjukkan seperti pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Sifat Tekan nanokomposit epoksi/montmorillonite *nanoclay*

Nanopartikel	Kadar (%)	Kekuatan tekan (MPa)	Perubahan nilai Kekuatan Tekan (%)	Referensi
Montmorillonite *nanoclay*	0	126.59	0	(Jumahat dkk, 2012)
	1	127.94	1.07	
	3	127.78	0.94	
	5	128.08	1.18	

Dapat dilihat pada Tabel 4.8 Aidah Jumahat, dkk pada tahun 2012 telah melakukan analisis mengenai pengaruh nanopartikel terhadap sifat mekanik material nanokomposit epoksi/montmorillonite *nanoclay* pada kadar tertentu terutama pada kekuatan tekan. Pengujian tekan pada nanokomposit yang diperkuat oleh partikel montmorillonite *nanoclay* menunjukkan hasil yang kurang begitu baik dengan terjadinya peningkatan nilai kekuatan tekan optimum hanya mencapai 1.18% pada penambahan dengan kadar 5% nanopartikel. Karena keterbatasan data yang diperoleh maka, Penambahan partikel pada kadar diatas 5% terhadap nilai kekuatan tekan tidak dapat di analisis secara komprehensif. Penurunan nilai pada penambahan montmorillonite *nanoclay* adalah akibat dari struktur interkalasi *nanoclay* menciptakan tegangan lokal yang tinggi dalam matriks selama kompresi dan adesi antarmuka nanopartikel-matriks yang lemah membatasi kemampuan untuk mentransfer beban dan deformasi plastis. Hal ini menunjukkan bahwa dengan adanya penambahan nanopartikel montmorillonite *nanoclay* dalam nanokomposit secara umum akan mempengaruhi peningkatan nilai kekuatan tekan meskipun tidak terlalu signifikan.

4.3.4 Kekuatan Lentur

Zyad salem alsagayar, dkk pada tahun 2015 telah melakukan penelitian mengenai material nanokomposit berbasis polimer epoksi. Penelitian tersebut menganalisis pengaruh kadar

penambahan nanopartikel Montmorillonite *nanoclay* pada kadar 0, 0.5, 1, 1.5 dan 2% terhadap sifat mekanik material nanokomposit terutama pada sifat Kekuatan lentur. Hasil pengujian dan peningkatan nilai kekuatan lentur ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Sifat Lentur nanokomposit epoksi/montmorillonite *nanoclay*

Nanopartikel	Kadar (%)	Kekuatan lentur (MPa)	Perubahan nilai Kekuatan Lentur (%)	Referensi
Montmorillonite *nanoclay*	0	104	0	(Alsagayar dkk, 2015)
	0.5	106	1.92	
	1	108	3.85	
	1.5	92	-11.54	
	2	87	-17.92	

Dapat dilihat pada Tabel 4.9 Zyad salem alsagayar, dkk pada tahun 2015 juga telah melakukan analisis mengenai pengaruh nanopartikel terhadap sifat mekanik material nanokomposit epoksi/montmorillonite *nanoclay* pada kadar tertentu terutama pada Kekuatan lentur. Pengujian lentur pada nanokomposit yang diperkuat oleh partikel montmorillonite *nanoclay* menunjukkan hasil kurang begitu baik dengan terjadinya peningkatan nilai Kekuatan lentur optimum hanya mencapai 3.85% pada penambahan dengan kadar 1% nanopartikel. Penambahan nanopartikel pada kadar diatas 1% akan meyebabkan terjadinya penurunan nilai Kekuatan lentur secara signifikan dari nilai sebelumnya hingga mencapai sebesar 15.38%. Penurunan nilai kekuatan lentur disebabkan oleh dispersi yang terjadi kurang baik dan aglomerasi yang terjadi antar partikel *nanoclay* seiring dengan penambahan kadarnya, serta adanya peningkatan nilai viskositas yang menyebabkan terbentuknya banyak *air-traps* dan *micro void*. Hal ini menunjukkan bahwa adanya keterbatasan kadar optimum penambahan nanopartikel Montmorillonite *nanoclay* dalam

nanokomposit yang mempengaruhi peningkatan nilai Kekuatan lentur pada kadar 1% nanopartikel.

4.3.5 Analisis Jurnal

Tinjauan sifat mekanik komposit diperkuat nanopartikel montmorillonite *nanoclay* berukuran pada rentang 1 – 200 nm. Pada penelitian yang telah dilakukan maka, didapatkan hasil analisis bahwa pada penambahan nanopartikel montmorillonite *nanoclay* secara umum akan berdampak kurang terlalu baik pada peningkatan sifat dari kekuatan tarik, kekuatan tekan, dan kekuatan lentur dari material nanokomposit. Hal ini disebabkan karena ukuran partakel yang cukup besar. Catatan penting dalam tinjauan jurnal mengenai nanokomposit epoksi/montmorillonite *nanoclay* juga telah dianalsis seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Man-Wai Ho, dkk pada tahun 2006 dan Zyad salem alsagayar, dkk pada tahun 2015 terdapat beberapa hal yang penting namun, tidak dicantumkan seperti halnya pada standar dan alat pengujian yang digunakan. Data yang diperoleh hanya mencantumkan grafik terkait pengaruh penambahan montmorillonite *nanoclay* terhadap nilai kekuatan tarik nanokomposit tanpa menyertakan data kuantitatifnya. Hal serupa juga ditemui pada penelitian yang telah dilakukan oleh Aidah Jumahat, dkk pada tahun 2012 yang tidak dicantumkan data kuantitatif dari pengaruh penambahan nanopartikel terhadap nilai Kekuatan tekan dari material epoksi/montmorillonite *nanoclay*. Jurnal yang diteliti oleh Man-Wai Ho, dkk pada tahun 2006 mengenai peningkatan nilai Kekuatan tarik juga dapat ditemui kesalahan pada perhitungan hasil pengujian yang menyebabkan nilai yang diperoleh mengalami fluktuasi yang tidak seharusnya akibat dari kesalahan pada proses ataupun *human error* yang terjadi. Hal yang terjadi pada data peneltian tersebut sayangnya belum dapat dijelaskan lebih rinci di dalam jurnal.

4.4 Epoksi/*Multi-Walled Carbon Nanotubes* (MWCNT)

Penelitian yang dilakukan Arash Montazeri, dkk pada tahun 2010 mengenai material nanokomposit yang diperkuat oleh

nanopartikel *Multi-Walled Carbon Nanotube* (MWCNT) digunakan material yaitu resin epoksi dengan viskositas rendah Ly564 (Araldite) dan *hardener* Hy560 yang diproduksi oleh Huntsman Co. Resin dan *hardener* masing-masing adalah jenis bisphenol-A dan polyamine. *Multi-walled carbon nanotubes* (MWCNT) yang digunakan dalam penelitian ini diproduksi oleh Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Iran. Panjang rata-rata dan diameter dari partikel MWCNT tanpa perlakuan masing-masing adalah 8,5 µm dan 20 nm. Pada penelitian yang dilakukan oleh Chufan Xiao, dkk pada tahun 2018 material yang digunakan adalah *Multi-walled carbon nanotubes* (MWCNT) yang diproduksi oleh Shenzhen Nanotech Port Co., Ltd, Cina. Diameter dari MWCNT adalah dari 15-25 nm dengan panjangnya berkisar dari 1 µm hingga 2,5 µm. Resin epoksi yang digunakan adalah resin epoksi bisphenol A (E-44) dengan nilai epoksi 0,44 mol/100g, yang diproduksi oleh Taizhou Huili Electronic Material Co., Ltd, Cina. *Curing agent* yang digunakan, polieter amina (D-230) yang diproduksi oleh Suzhou Chanco Industrial Co., Ltd, Cina. Sedangkan, pada penelitian yang dilakukan oleh Kamran Alasvand Zarasvand dan Hossein Golestanian pada tahun 2017 material yang digunakan adalah Epoxy FK20, yang merupakan resin jenis bisphenol-A dengan *hardener* yang disesuaikan. MWCNT yang digunakan diproduksi oleh US Research Nanomaterials Inc. (US-NANO) dengan Panjang 30 µm dan diameter luar 5-15 nm.

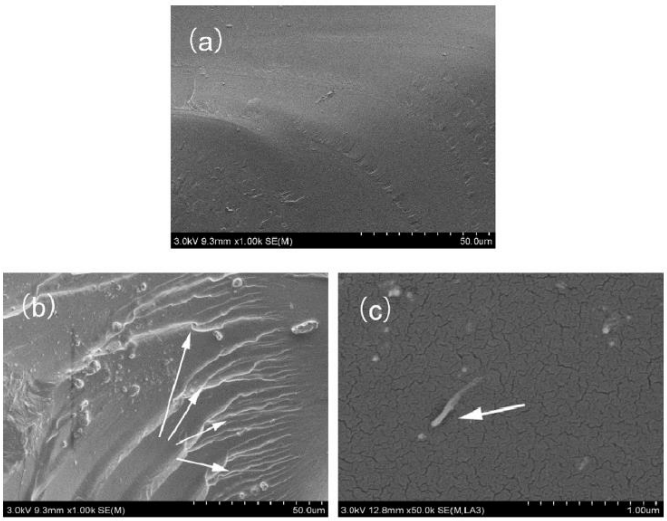
Proses manufaktur nanokomposit yang dilakukan oleh Arash Montazeri, dkk pada tahun 2010 adalah dengan pencampuran resin epoksi, *hardener*, dan nanopartikel secara menyeluruh. Proses pencampuran nanopartikel ke dalam campuran resin dilakukan terlebih dahulu, kemudian pada campuran dilakukan proses sonikasi (Bandelin HD3200, 20 kHz) selama 2 jam dengan amplitudo 60%. Setelah proses sonikasi, *hardener* ditambahkan ke dalam campuran dan diaduk selama 10 menit pada kecepatan150 rpm. *Bubble* dihilangkan dengan menempatkan campuran ke dalam ruang vakum. Proses akhir adalah penuangan campuran ke

dalam cetakan untuk terjadinya *curing* pada temperatur 60 ℃ selama 1 jam kemudian 2 jam pada temperatur 110 ℃. Pada penelitian yang dilakukan oleh Chufan Xiao, dkk pada tahun 2018 manufaktur dilakukan dengan cara degradasi terlebih dahulu terhadap epoksi pada temperatur 70℃ selama 12 jam. Kemudian, campuran MWCNT dan epoksi dilakukan proses pengadukan mekanik (tipe JJ-1A, Changzhou Kaihang Instrument Co., Ltd.) dengan proses pengadukan selama 12 jam dengan kecepatan putaran pengaduk 2500 rpm. Untuk meningkatkan tingkat dispersi dari nanopartikel maka campuran dimasukkan kedalam *ultrasonic bath* tipe KQ-250DB ultrasonic treatment machine yang diproduksi oleh Kunshan Ultrasonic Instruments Co., Ltd. Setelah itu, *curing agent* polieter amina (D-230) ditambahkan pada campuran tersebut dan didispersikan secara ultrasonik dalam *bath* (40 kHz, 125 Watt) selama 30 menit dengan temperatur 40℃ dan kecepatan pengadukan 1500 rpm di waktu yang sama. Kemudian campuran di vakum selama 30 menit lalu dituangkan kedalam mold yang telah dilapisi dengan *release agent*. Tahap terakhir yaitu pendiaman pada temperatur 25℃ selama 24 jam dan 60 ℃ selama 12 jam. Sedangkan, pada penelitian yang dilakukan oleh K. Alasvand Zarasvand dan H. Golestanian, (2017) proses manufaktur dilakukan dengan menggunakan pengaduk mekanik pada kecepatan 1000 rpm selama 60 menit. Untuk proses homogenisasi dispersi dari nanopartikel dan mengurangi kemungkinan terjadinya aglomerasi, campuran disonikasi selama 60 menit menggunakan *ultrasonic bath*. Rendaman air es digunakan untuk menjaga suhu larutan selama proses sonikasi. Proses sonikasi dihentikan selama 3 menit setiap setelah 10 menit. Selanjutnya, campuran ditempatkan ke dalam vakum selama 15 menit untuk menghilangkan udara yang terperangkap. Setelah *degassing*, *hardener* kemudian ditambahkan ke dalam campuran diaduk perlahan selama 5 menit. Kemudian, campuran ditempatkan ke dalam vakum kembali selama 10 menit. Pada proses akhir, campuran nanokomposit dituangkan ke dalam cetakan untuk

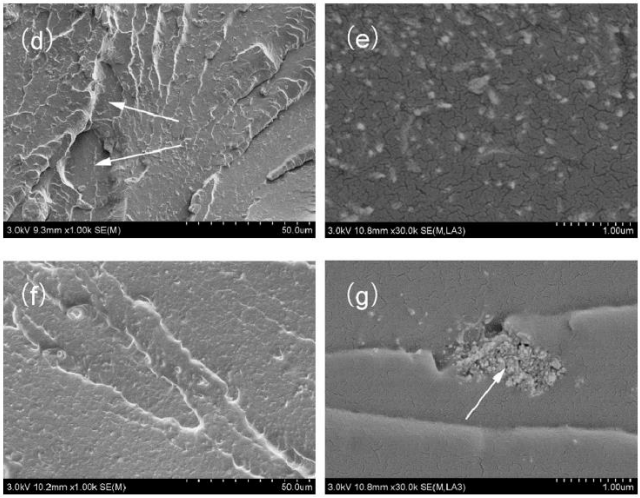
proses *curing* pada temperatur 85 ℃ selama 3 jam diikuti oleh *post-curing* selama satu jam pada 120 ℃.

4.4.1 Morfologi

Morfologi material nanokomposit yang diperkuat oleh *Multi-Walled Carbon Nanotube* (MWCNT) telah diteliti oleh Chufan Xiao, dkk pada tahun 2018 melalui pengujian Scanning electron microscope (SEM, Hitachi S4800) pada penambahan nanopartikel dengan kadar 0, 0.5, 1, dan 1.5%. Perbesaran yang dilakukan dalam pengujian adalah perbesaran pada 100 dan 400x yang ditunjukkan pada gambar 4.5 dan 4.6.



Gambar 4.5 Hasil Pengujian SEM material nanokomposit yang diperkuat MWCNT (a) Tanpa penambahan (b) 0,5% (c) pembesaran tinggi pada 0.5%
(Xiao dkk, 2018)



Gambar 4.6 Hasil Pengujian SEM material nanokomposit yang diperkuat MWCNT (d) 1% (e) pembesaran tinggi pada 1% (f) 1,5%, (g) pembesaran tinggi pada 1.5% (Xiao dkk, 2018)

Partikel *Multi-Walled Carbon Nanotube* (MWCNT) ditunjukkan oleh warna cerah atau flek putih pada gambar SEM tersebar cukup sragam dalam matriks epoksi. Warna cerah atau flek putih pada gambar SEM semakin banyak terlihat seiring dengan penambahan kadar dari partikel *Multi-Walled Carbon Nanotube* (MWCNT). Dapat dilihat juga bahwa terjadi tegangan permukaan atau *pull-out effect* yang diebabkan oleh partikel MWCNT di beberapa titik yang tampak jelas antara nanopartikel dan permukaan polimer epoksi. Hal tersebut ditunjukkan melalui sudut-sudut yang terbentuk pada permukaan patahan material nanokomposit seiring dengan penambahan kadar tertentu dari partikel *Multi-Walled Carbon Nanotube* (MWCNT) seperti yang ditunjukkan pada gambar.

Pada hasil pengujian SEM, morfologi dari permukaan material nanokomposit yang diperkuat nanopartikel MWCNT tersebar cukup seragam secara eksfoliasi pada material polimer

epoksi yang menandakan baiknya sifat ketercampuran dari material MWCNT dalam polimer epoksi. Pada penelitiannya Chufan Xiao, dkk juga membahas terkait hasil pengujian SEM pada pengaruhnya terhadap sifat mekanik dari material nanokomposit dimana seiring penambahan partikel MWCNT mengakibatkan terjadinya peningkatan kekasaran permukaan pada material. Pada Gambar 4.5 terlihat jelas pada epoksi tanpa penambahan nanopartikel menunjukkan permukaan yang mulus dengan sedikit *micro crack* yang tergolong kedalam jenis patahan getas. Lalu, pada penambahan nanopartikel seperti pada Gambar 4.6 dengan kadar tertentu menyebabkan permukaan menjadi kasar dan tidak seragam seperti dasar sungai yang ditandai dengan semakin banyaknya *micro crack* dan semakin besar daerah deformasi mikroplastik yang terbentuk. Hal ini menyebabkan terjadinya peningkatan sifat mekanik pada material nanokomposit melalui mekanisme *pull-out effect* yang ditimbulkan oleh nanopartikel. Sedangkan, pada penambahan diatas 1% dapat dilihat bahwa terjadi keterikatan dan aglomerasi pada partikel MWCNT. Hal tersebut menunjukkan adanya indikasi penurunan sifat mekanik dari nanokomposit epoksi/MWCNT pada penambahan nanopartikel dengan kadar diatas 1%. Hal tersebut semakin jelas tampak pada gambar 4.6 dengan penambahan 1.5% nanopartikel.

4.4.2 Kekuatan Tarik

Arash Montazeri, dkk pada tahun 2010 telah melakukan penelitian mengenai material nanokomposit berbasis polimer epoksi. Penelitian tersebut menganalisis pengaruh kadar penambahan dan perlakuan terhadap nanopartikel *Multi-Walled Carbon Nanotube* (MWCNT) pada kadar 0, 0.1, 0.5, 1, 2, dan 3% terhadap morfologi dan sifat mekanik material nanokomposit terutama terhadap sifat tarik dari nanokomposit. Pengujian tarik dilakukan menggunakan mesin model Hounsfield H100KS dengan beban tegangan statis berkapasitas 10 kN. Extensometer yang digunakan adalah Instron dynamic extensometer dengan *gauge* 12,5 mm dan kecepatan *crosshead* 1,5 mm/menit. Pengujian ini

berdasarkan standar pengujian ASTM D638-IV. Penelitian yang dilakukan oleh Chufan Xiao, dkk pada tahun 2018 nanopartikel *Multi-Walled Carbon Nanotube* (MWCNT) diberikan pada kadar berbeda yaitu 0%, 0.5%, 1%, dan 1.5% dengan alat pengujian menggunakan CMT 5105 *electronic universal testing machine*. Kecepatan *cross-head* pada 5 mm/menit sesuai dengan standar pengujian ASTM D638-2014. Sedangkan, penelitian yang dilakukan oleh Kamran Alasvand Zarasvand dan Hossein Golestanian pada tahun 2017 nanopartikel *Multi-Walled Carbon Nanotube* (MWCNT) diberikan pada kadar yang berbeda yaitu 0%, 0.15%, 0.25%, 0.35%, 0.45%, dan 0.55% dengan standar pengujian yang sama. Dimensi dari spesimen uji yang digunakan adalah 115 mm x 12.7 mm x 3 mm. Hasil pengujian dan peningkatan nilai kekuatan tarik ditunjukkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Sifat tarik nanokomposit epoksi/MWCNT

Nanopartikel	Kadar (%)	Kekuatan tarik (MPa)	Perubahan nilai Kekuatan Tarik (%)	Referensi
MWCNT	0	64	0	(Montazeri dkk, 2010)
	0.1	67	4.69	
	0.5	69	7.81	
	1	71	10.94	
	1.5	74	15.63	
	2	75	17.19	
	3	71	10.94	
	0	37.62	0	(Xiao dkk, 2018)
	0.5	52.22	38.81	
	1	51.30	36.36	
	1.5	48.02	27.64	
	0	39.77	0	(Zarasvand dan Golestanian, 2017)
	0.15	41.44	4.20	
	0.25	44.82	12.69	
	0.35	47.54	19.53	

0.45	48.11	20.97
0.55	51.03	28.31

Dapat dilihat pada Tabel 4.10 Arash Montazeri, dkk pada tahun 2010 telah melakukan analisis mengenai pengaruh nanopartikel terhadap sifat mekanik material nanokomposit epoksi/MWCNT pada kadar tertentu terutama pada Kekuatan tarik. Pengujian Tarik pada nanokomposit yang diperkuat oleh partikel MWCNT menunjukkan hasil yang cukup baik dengan terjadinya peningkatan nilai kekuatan tarik optimum mencapai 17.19% pada penambahan partikel dengan kadar 2%. Penambahan partikel pada kadar diatas 2% akan meyebabkan turunnya nilai kekuatan tarik dari nilai sebelumnya hingga mencapai sebesar 6.25%. Sedangkan, penelitian yang dilakukan oleh Chufan Xiao, dkk pada tahun 2018 dan Kamran Alasvand Zarasvand dan Hosssein Golestanian pada 2017 menunjukkan penambahan MWCNT menyebabkan terjadinya peningkatan nilai kekuatan tarik optimum menjadi sekitar 38.81% pada kadar 0.5% nanopartikel dan mulai mengalami penurunan nilai kekuatan tarik pada penambahan dengan kadar diatas 0.5%. Hal ini menunjukkan bahwa adanya keterbatasan kadar optimum MWCNT dalam nanokomposit yang mempengaruhi peningkatan nilai kekuatan tarik pada penambahan 0.5% hingga 2% nanopartikel. Penurunan nilai kekuatan Tarik nanokomposit dipengaruhi oleh aglomerasi yang terjadi serta akibat dari perilaku resin polimer epoksi yang jauh lebih *brittle* dengan adanya penambahan MWCNT kedalam matriks polimer epoksi yang dijelaskan pada bagian morfologi.

4.4.3 Kekuatan Tekan

Kamran Alasvand Zarasvand dan Hossein Golestanian pada tahun 2017 telah melakukan penelitian mengenai material nanokomposit berbasis polimer Epoksi. Penelitian tersebut menganalisis pengaruh kadar penambahan nanopartikel *Multi-Walled Carbon Nanotube* (MWCNT) pada kadar 0, 0.15, 0.25, 0.35, 0.45, dan 0.55% terhadap sifat mekanik material nanokomposit terutama pada sifat Kekuatan tekan dari

nanokomposit. pengujian dilakukan menggunakan standar pengujian ASTM D695 dengan spesimen berbentuk silinder, panjang 9 mm dan diameter 8.5 mm. hasil pengujian Kekuatan tekan ditunjukkan seperti pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Sifat Tekan nanokomposit epoksi/MWCNT

Nanopartikel	Kadar (%)	Kekuatan tekan (MPa)	Perubahan nilai Kekuatan Tarik (%)	Referensi
MWCNT	0	105.3	0	(Zarasvand dan Golestanian, 2017)
	0.15	109.7	4.18	
	0.25	116.6	10.73	
	0.35	117.1	11.21	
	0.45	129.9	23.36	
	0.55	132.57	25.90	

Dapat dilihat pada Tabel 4.11 Kamran Alasvand Zarasvand dan Hossein Golestanian pada tahun 2017 telah melakukan analisis mengenai pengaruh nanopartikel terhadap sifat mekanik material nanokomposit epoksi/MWCNT pada kadar tertentu terutama pada kekuatan tekan. Pengujian tekan pada nanokomposit yang diperkuat oleh partikel MWCNT menunjukkan hasil sangat baik dengan terjadinya peningkatan nilai kekuatan tekan optimum hingga mencapai 25.90% pada penambahan nanopartikel dengan kadar 0.55%. Akibat dari keterbatasan data yang diperoleh maka, Penambahan partikel pada kadar diatas 0.55% terhadap nilai kekuatan tekan tidak dapat di analisis secara komprehensif. Peningkatan nilai kekuatan tekan pada nanokomposit adalah akbiat dari morfologinya yang dimana dapat terlihat jelas partikel MWCNT terdispersi secara baik dan terdistribusi secara merata dalam polimer epoksi sehingga dapat menahan deformasi yang diterima oleh matriks polimer epoksi dengan lebih baik.

4.4.4 Kekuatan Lentur

Chufan Xiao, dkk pada tahun 2018 telah melakukan penelitian mengenai material nanokomposit berbasis polimer epoksi. Penelitian tersebut menganalisis pengaruh kadar penambahan nano partikel *Multi-Walled Carbon Nanotube* (MWCNT) pada kadar 0, 0.5, 1, dan 1.5% terhadap morfologi dan sifat mekanik material nanokomposit terutama pada sifat kekuatan lentur dari nanokomposit. Pengujian dilakukan dengan menggunakan CMT 5105 electronic universal testing machine dengan prinsip pengujian *Three-Point Bending* sesuai dengan standar uji ASTM D790-2015, dimana kecepatan tekukan yang digunakan adalah pada 2 mm/menit. Hasil pengujian kekuatan lentur ditunjukkan pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Sifat Lentur nanokomposit epoksi/MWCNT

Nanopartikel	Kadar (%)	Kekuatan lentur (MPa)	Perubahan nilai Kekuatan Lentur (%)	Referensi
MWCNT	0	59.2	0	(Xiao dkk, 2018)
	0.5	82.7	39.70	
	1	77.8	31.42	
	1.5	74.6	26.01	

Dapat dilihat pada Tabel 4.12 Chufan Xiao, dkk pada tahun 2018 telah melakukan analisis mengenai pengaruh nanopartikel terhadap sifat mekanik material nanokomposit epoksi/MWCNT pada kadar tertentu terutama pada sifat lentur. Pengujian Kekuatan lentur pada nanokomposit yang diperkuat oleh partikel MWCNT menunjukkan hasil yang cukup baik dengan terjadinya peningkatan nilai Kekuatan lentur optimum mencapai 39.70% pada penambahan partikel dengan kadar 0.5%. Penambahan partikel pada kadar diatas 0.5% meyebabkan terjadinya penurunan nilai Kekuatan lentur dari nilai sebelumnya hingga mencapai sebesar 8.28%. Penurunan nilai kekuatan lentur pada penambahan diatas

1% menunjukkan bahwa adanya fenomena keterikatan dan aglomerasi dari MWCNT. Selain itu, dengan seiring penambahan kadarnya maka, status distribusi dari nanopartikel menjadi semakin buruk sehingga menghambat keterbasahan total dan ikatan antar muka dari MWCNT dan epoksi. Hal ini menunjukkan bahwa adanya keterbatasan kadar optimum penambahan nanopartikel MWCNT dalam nanokomposit yang mempengaruhi peningkatan nilai Kekuatan lentur pada kadar 0.5% seperti yang dijelaskan lebih rinci pada bagian morfologi.

4.4.5 Analisis Jurnal

Tinjauan sifat mekanik komposit dengan nanopartikel *multi-walled carbon nanotubes* berukuran pada rentang 15 – 25 nm. Pada penelitian yang telah dilakukan, didapatkan hasil analisis bahwa pada penambahan nanopartikel *Multi-Walled Carbon Nanotube* (MWCNT) akan berdampak sangat baik pada peningkatan sifat dari kekuatan tarik, kekuatan tekan, dan kekuatan lentur dari material nanokomposit yang terjadi secara merata dan optimal pada ukuran partikel. Catatan penting dalam tinjauan jurnal mengenai nanokomposit epoksi/MWCNT juga telah dianalsis seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Kamran Alasvand Zarasvand dan Hossein Golestanian pada tahun 2017 dimana tidak dijelaskannya tempat asal produksi dari material yang digunakan dan jenis *hardener* pada matriks polimer epoksi yang tidak dicantumkan. Selain itu, terdapat juga beberapa hal seperti pada data kekuatan tarik dan kekuatan tekan yang tidak menggunakan variable diatas 0.55% kadar nanopartikel, dimana pada kadar tersebut tidak terlihat pola penurunan nilai sifat mekanik dari material nanokomposit. Hal tersebut tentunya akan sangat mempengaruhi hasil analisis yang dilakukan karena tidak diketahuinya karakteristik dari material yang digunakan serta data yang ditampilkan kurang komprehensif.

4.5 Epoksi/CTBN *Liquid Rubber*

Penelitian telah dilakukan oleh Jianing Zhang, dkk pada tahun 2016 mengenai material nanokomposit yang diperkuat oleh

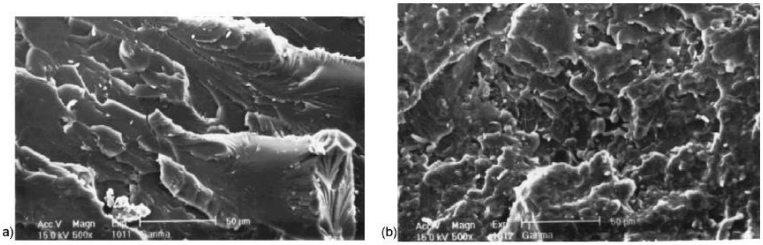
nanopartikel CTBN *liquid rubber*. Material digunakan yaitu polimer epoksi DGEBA yang diperoleh dari Araldite F, Huntsman dengan kandungan epoksida yaitu 5,20 – 5,35 equiv/kg. *curing agent* yang digunakan adalah piperidine yang diproduksi oleh Sigma–Aldrich, Australia (amina sekunder siklik). Nanopartikel CTBN *liquid rubber* yang digunakan adalah jenis Hycar CTBN 1300X13 yang diproduksi oleh Imerys Tableware New Zealand Limited dengan berat molekul sekitar 3500. Penelitian yang dilakukan oleh Fang Liu, dkk pada tahun 2017 mengenai material nanokomposit epoksi/CTBN *liquid rubber* menggunakan material yang sama. Rasio yang digunakan adalah 100:5 berdasarkan berat. Sedangkan, pada penelitian yang dilakukan oleh Garima Tripathi dan Deepak Srivastava pada tahun 2007 material yang digunakan adalah polimer epoksi DGEBA (viskositas 1000-1500 mPa.s pada 27℃) dengan tipe LY 5052 yang memiliki berat epoksida 192 equiv/g. *Curing agent* yang digunakan yaitu HT 976, 4,4 -diamino diphenyl sulphone (DDS). Material diperoleh dari Ciba Specialty Chemicals Pvt. Ltd., Mumbai, India. Nanopartikel CTBN *Liquid rubber* yang digunakan adalah Hycar 1300×13 (viskositas 625.000 mPa.s pada 27℃) yang diproduksi oleh Emerald Performance Materials, LLC, Hong Kong dengan berat molekul 3500 yang mengandung konten akrilonitril 27% dan konten karboksil 32%.

Proses manufaktur yang dilakukan oleh Jianing Zhang, dkk pada tahun 2016 adalah pencampuran polimer epoksi dengan CTBN *liquid rubber* dalam gelas kimia. Kemudian, gelas diletakkan di atas *hot plate* dan diaduk menggunakan *mechanical mixer* (200 rpm) selama 120 menit dengan temperatur 80℃ untuk mencapai campuran yang homogen diikuti dengan proses degassing dalam oven vakum (sekitar -100 kPa) pada 100℃ selama sekitar 2 jam. Setelah proses dilakukan, kemudian campuran ditambahkan dengan *hardener* piperidin pada rasio 100: 5 dan diaduk secara perlahan. Tahap akhir adalah penuangan campuran kedalam cetakan yang telah di *pre heat* pada temperatur 120℃ selama 16 jam. Penelitian yang dilakukan oleh Fang Liu, dkk pada tahun 2017 menggunakan proses manufaktur yaitu pencampuran

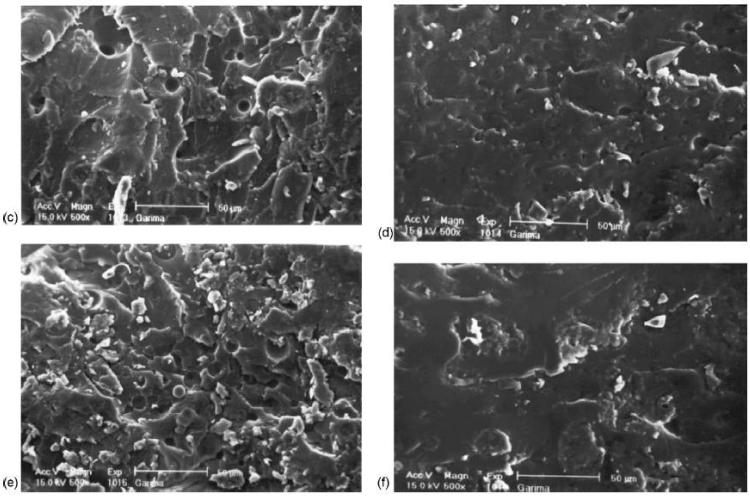
matriks epoksi DGEBA dengan partikel CTBN *Liquid rubber* menggunakan *mechanical mixer* pada temperatur 80℃ selama 1 jam. Setelah itu, campuran ditambahkan dengan *hardener* pada perbandingan 100:5 berdasarkan berat dan diaduk menggunakan *mechanical mixer* selama 5 menit. *Bubble* dihilangkan pada komposit menggunakan oven vakum (sekitar -100 KPa) selama sekitar 30 menit. Proses *curing* dilakukan di dalam *silicon rubber mold* pada temperatur 80 ℃ selama 16 jam. Sedangkan, penelitian yang dilakukan oleh Garima Tripathi dan Deepak Srivastava pada tahun 2007 adalah melakukan proses *mechanical mixing* terhadap campuran epoksi, *hardener*, dan nanopartikel CTBN *Liquid rubber* pada 120℃ selama 1 jam. Kemudian, pada campuran yang telah homogen ditambahkan *hardener* DSS pada kadar yang telah ditentukan dan diaduk kembali pada temperatur 130 – 135 ℃ selama setengah jam. Proses akhir adalah penuangan campuran kedalam cetakan besi yang telah di *pre heat* dalam oven pada temperatur 170℃ selama 1 jam. Proses *curing* selama 2 jam pada temperatur 200℃.

4.5.1 Morfologi

Morfologi material nanokomposit yang diperkuat oleh CTBN *Liquid rubber* telah diteliti oleh Garima Tripathi dan Deepak Srivastava pada tahun 2007 melalui pengujian SEM pada penambahan nanopartikel CTBN dengan kadar 0, 5, 10, 15, 20, dan 25%. Alat pengujian SEM yang digunakan yaitu model Joel JSM 5800. Sebelum dilakukan pengujian, spesimen terlebih dahulu dilapisi dengan emas. Perbesaran yang dilakukan dalam pengujian adalah perbesaran 500x yang ditunjukkan pada gambar 4.7 dan 4.8.



Gambar 4.7 Hasil Pengujian SEM material nanokomposit yang diperkuat CTBN *Liquid rubber* (a) tanpa penambahan (b) penambahan 5%
(Tripathi dan Sivastava, 2007)



Gambar 4.8 Hasil Pengujian SEM material nanokomposit yang diperkuat CTBN *Liquid rubber* (c) penambahan 10% (d) penambahan 15% (e) penambahan 20% (f) Penambahan 25%
(Tripathi dan Sivastava, 2007)

Partikel CTBN *Liquid rubber* ditunjukkan oleh warna cerah atau flek putih pada hasil SEM yang tersebar cukup seragam di seluruh bagian material polimer epoksi. Warna cerah atau flek

putih pada gambar SEM semakin banyak terlihat seiring dengan penambahan dari partikel CTBN *Liquid rubber* hingga pada kadar hingga 20% dan mulai mengalami dispersi secara lebih terhadap polimer epoksi pada kadar 25% keatas. Pada hasil SEM patahan material yang tanpa penambahan nanopartikel menunjukkan karakteristik sistem getas dengan permukaan retak yang halus seperti kaca. Pada penambahan nanopartikel juga dapat dilihat bahwa terjadi tegangan permukaan di beberapa titik yang tampak jelas antara partikel dan permukaan polimer epoksi melalui sudut-sudut yang terbentuk pada permukaan patah material. Hal ini terjadi pada material nanokomposit seiring dengan penambahan kadar tertentu dari CTBN *Liquid rubber*. Selain itu, pada penambahan nanopartikel juga tampak dengan jelas semakin besarnya ukuran partikel sering dengan penambahan kadarnya.

Pada hasil pengujian SEM, morfologi dari permukaan material nanokomposit yang diperkuat nanopartikel CTBN *Liquid rubber* tersebar lebih seragam pada material polimer epoksi yang menandakan sangat baiknya sifat ketercampuran material CTBN *Liquid rubber* dalam polimer epoksi. Namun sayangnya, hal tersebut diikuti dengan turunnya beberapa nilai sifat mekanik dari material nanokomposit. sebagaimana pada penelitiannya, Garima Tripathi dan Deepak Srivastava menganalisis hasil yang terdapat pada SEM terhadap sifat mekanik dari material nanokomposit akibat dari peningkatan jumlah relative terlarut dari CTBN *liquid rubber* karena kadarnya meningkat. Penurunan sifat mekanik ini disebabkan karena terjadinya aglomerasi atau penggabungan partikel-partikel CTBN *liquid rubber* yang terdispersi. Oleh karena itu, dapat dianalisis bahwa penurunan beberapa sifat mekanik yang terjadi menyebabkan kemampuan penyerapan energi yang menghambat deformasi pada nanokomposit semakin meningkat dengan seiring penambahan nanopartikel CTBN *liquid rubber*. Hal ini dapat menjadi perhatian khusus kedepannya terhadap kemampuan menahan beban impak dari material nanokomposit yang diperkuat oleh nanopartikel CTBN *liquid rubber*.

4.5.2 Kekuatan Tarik

Jianing Zhang, dkk pada tahun 2016 dan Fang Liu, dkk pada tahun 2017 telah melakukan penelitian mengenai material nanokomposit berbasis polimer epoksi. Penelitian tersebut menganalisis pengaruh kadar penambahan nano partikel CTBN *Liquid rubber* pada kadar 0, 5, dan 10% dan campurannya dengan partikel jenis lain terhadap sifat mekanik material nanokomposit terutama pada sifat tarik dari nanokomposit. Pengujian dilakukan berdasarkan standar ASTM dengan ukuran spesimen penampang yaitu 13 mm x 5 mm pada *gauge length*. Ekstensometer dengan panjang pengukur 50 mm dipasang pada permukaan spesimen tarik untuk menentukan regangan aksial. Laju pemuatan yang digunakan 1 mm/menit. Alat uji yang digunakan adalah *universal testing machine* (Instron 5567). Pengujian dilakukan pada temperatur sekitar 23℃ dengan kelembaban relative 50%. Penelitian ini juga dilakukan oleh Fang Liu, dkk pada tahun 2017 mengenai material nanokomposit berbasis polimer epoksi pada kadar penambahan CTBN *liquid rubber* yang sama dan alat pengujian yang tidak jauh berbeda. Sedangkan, pada penelitian yang dilakukan oleh Garima Tripathi dan Deepak Srivastava pada tahun 2007 dengan kadar penambahan yang berbeda yaitu 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25% dengan menggunakan alat pengujian Tinius Olsen Patent No. 2,784,048 *machine* pada kecepatan *crosshead* yaitu 1 mm/menit menggunakan standar ASTM D-638. Data hasil pengujian kekuatan tarik dari jurnal tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.13 mengenai peningkatan nilai kekuatan tarik nanokomposit epoksi/ CTBN *liquid rubber*.

Tabel 4.13 Sifat Tarik nanokomposit epoksi/ CTBN *liquid rubber*

Nanopartikel	Kadar (%)	Kekuatan Tarik (MPa)	Perubahan nilai Kekuatan Tarik (%)	Referensi
CTBN*Liquid rubber*	0	65.8	0	(Zhang dkk, 2016)
	5	67.3	2.28	

10	60.1	-8.66	
0	45	0	
5	35	-22.22	(Tripathi
10	32	-28.88	dan
15	31	-31.11	Srivastava,
20	29	-35.55	2007)
25	16	-64.44	

Tabel 4.14 *Elongation break* nanokomposit epoksi/ CTBN *liquid rubber*

Nanopartikel	Kadar (%)	Elongation break (%)	Referensi
CTBN*Liquid rubber*	0	7	(Tripathi dan Srivastava, 2007)
	5	7.5	
	10	8	
	15	8.5	
	20	9	
	25	10	

Tabel 4.15 Sifat Impak nanokomposit epoksi/ CTBN *liquid rubber*

Nanopartikel	Kadar (%)	Kekuatan Impak ($J.cm^2$)	Perubahan nilai Kekuatan Impak (%)	Referensi
CTBN*Liquid rubber*	0	19	0	(Tripathi dan Srivastava, 2007)
	5	22	15.79	
	10	26	36.84	
	15	32	68.42	
	20	50	163.2	
	25	38	100	

Dapat dilihat pada Tabel 4.13 Jianing Zhang, dkk pada tahun 2016 juga telah melakukan analisis mengenai pengaruh nanopartikel terhadap sifat mekanik material nanokomposit epoksi/CTBN *Liquid rubber* pada kadar tertentu terutama pada kekuatan tarik. Pengujian tarik pada nanokomposit yang diperkuat

CTBN *Liquid rubber* menunjukkan hasil yang kurang begitu baik dengan terjadinya peningkatan nilai kekuatan tarik optimum hanya mencapai 2.28% pada penambahan partikel dengan kadar 5%. Penambahan partikel pada kadar diatas 5% akan meyebabkan turunnya nilai kekuatan tarik dari nilai sebelumnya hingga mencapai sebesar 10.94 % keatas. Sedangkan, penelitian yang dilakukan oleh Garima Tripathi dan Deepak Srivastava pada tahun 2007 menunjukkan hasil yang sangat tidak baik dari penambahan nanopartikel yaitu terjadinya penurunan nilai kekuatan tarik hingga mencapai 64.4% pada penambahan dengan kadar 5 – 25 %. Hal ini menunjukkan bahwa adanya keterbatasan kadar optimum penambahan nanopartikel CTBN *Liquid rubber* dalam nanokomposit yang mempengaruhi peningkatan nilai kekuatan tarik pada kadar 5% dan penurunan nilai yang terjadi juga diakibatkan dari peningkatan jumlah relatif nanopartikel CTBN *liquid rubber* terlarut karena kandungannya yang meningkat. Jenis nanopartikel CTBN *liquid rubber* yang tergolong kedalam jenis *soft particle* juga menjadi pengaruh yang besar pada sifat mekanik dari material nanokomposit yang dihasilkan. Pengaruh positif penambahan CTBN *Liquid rubber* dapat dianalisis pada persentase *elongation break* dan Kekuatan Impak yang diperoleh dari data dengan terjadinya peningkatan secara signifikan hingga mencapai masing-masing 3% dan 163.2% meskipun, penuruan nilai dalam kekuatan tarik terjadi cukup besar seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.14 dan 4.15. Hal tersebut disebabkan karena kemampuan penyerapan energi yang menghambat deformasi pada nanokomposit mengalami peningkatan seiring dengan penambahan jenis nanopartikel *soft* yaitu CTBN *Liquid rubber*.

4.5.3 Kekuatan Tekan

Fang Liu, dkk pada tahun 2017 juga telah melakukan penelitian mengenai material nanokomposit berbasis polimer epoksi. Penelitian tersebut menganalisis pengaruh kadar penambahan nano partikel CTBN *Liquid rubber* pada kadar 0, 5, dan 10% terhadap sifat mekanik material nanokomposit terutama

pada sifat tekan dari nanokomposit. pengujian yang dilakukan menggunakan alat uji Instron 5567 *universal testing machine* dengan standar pengujian berdasarkan kepada ASTM D695 dengan kecepatan *cross-head* adalah 1,3 mm/menit. Hasil pengujian dan peningkatan nilai dari Kekuatan tekan seperti data yang ditunjukkan pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16 Sifat Tekan nanokomposit epoksi/CTBN *Liquid rubber*

Nanopartikel	Kadar (%)	Kekuatan Tekan (MPa)	Perubahan nilai Kekuatan Tekan %	Referensi
CTBN *Liquid rubber*	0	89.1	0	(Liu dkk, 2017)
	5	92.4	3.70	
	10	89.3	0.22	

Dapat dilihat pada Tabel 4.16 Fang Liu, dkk pada tahun 2017 juga telah melakukan analisis mengenai pengaruh nanopartikel terhadap sifat mekanik material nanokomposit Epoksi/CTBN *Liquid rubber* pada kadar tertentu terutama pada kekuatan tekan. Pengujian tekan pada nanokomposit yang diperkuat CTBN *Liquid rubber* menunjukkan hasil yang kurang begitu baik dengan terjadinya peningkatan nilai kekuatan tekan optimum hanya mencapai 3.70% pada penambahan partikel dengan kadar 5%. Penambahan partikel pada kadar diatas 5% akan meyebabkan turunnya nilai kekuatan tekan dari nilai sebelumnya hingga mencapai 3.48% keatas. Hal ini menunjukkan bahwa adanya keterbatasan kadar optimum dari penambahan nanopartikel CTBN *Liquid rubber* dengan karakteristiknya dalam nanokomposit yang mempengaruhi nilai kekuatan tekan pada kadar 5% nanopartikel.

4.5.4 Kekuatan Lentur

Garima Tripathi dan Deepak Srivastava pada tahun 2007 telah melakukan penelitian mengenai material nanokomposit

berbasis polimer epoksi. Penelitian tersebut menganalisis pengaruh kadar penambahan nano partikel CTBN *Liquid rubber* pada kadar 0, 5, 10, 15, 20, dan 25% terhadap morfologi dan sifat mekanik material nanokomposit terutama pada sifat lentur dari nanokomposit. pengujian dilakukan menggunakan mesin uji Hounsfield Tensometer W-5236 yang dilengkapi dengan *three-point bending fixture* pada kecepatan *crosshead* 1 mm/menit dengan standar pengujian berdasarkan kepada ASTM D-790. Hasil pengujian dan peningkatan nilai kekuatan lentur seperti pada data yang ditunjukkan oleh Tabel 4.17.

Tabel 4.17 Sifat Lentur nanokomposit epoksi/CTBN *Liquid rubber*

Nanopartikel	Kadar (%)	Kekuatan lentur (MPa)	Perubahan nilai Kekuatan Lentur (%)	Referensi
CTBN *Liquid rubber*	0	140	0	(Tripathi dan Srivastava, 2007)
	5	105	-25.00	
	10	55	-60.71	
	15	45	-67.86	
	20	29	-79.29	
	25	28	-80.00	

Dapat dilihat pada Tabel 4.17, Kekuatan lentur pada nanokomposit yang diperkuat CTBN *Liquid rubber* menunjukkan hasil yang sangat buruk dengan terjadinya penurunan nilai Kekuatan lentur secara signifikan mencapai 25% pada penambahan partikel dengan kadar 5%. Penambahan partikel pada kadar diatas 5% akan meyebabkan semakin turunnya nilai Kekuatan lentur dari nilai sebelumnya hingga mencapai sebesar 80% pada penambahan 25% nanopartikel. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan nanopartikel CTBN *Liquid rubber* dalam nanokomposit sangat berpengaruh tidak baik dengan ditunjukkannya penurunan terhadap nilai Kekuatan lentur secara

signifikan. Faktor lain yang mempengaruhi juga disebabkan oleh peningkatan jumlah relatif dari CTBN *Liquid rubber* terlarut saat kadar CTBN *Liquid rubber* ditingkatkan. Persen perpanjangan saat putus dari nanokomposit meningkat terus menerus dengan penambahan kadar dari CTBN *Liquid rubber* dalam campuran.

4.5.5 Analisis Jurnal

Sifat mekanik komposit dengan nanopartikel CTBN *Liquid rubber* berat molekul 3500 yang telah dilakukan dan didapatkan hasil analisis bahwa pada penambahan nanopartikel CTBN *liquid rubber* secara umum tidak berdampak baik pada peningkatan sifat dari kekuatan tarik, kekuatan tekan, dan kekuatan lentur material nanokomposit. Penambahan CTBN memungkinkan terjadinya penurunan nilai yang signifikan pada penambahan dengan kadar diatas 5%. Catatan penting dalam tinjauan jurnal mengenai nanokomposit epoksi/CTBN *liquid rubber* juga telah dianalsis seperti pada jurnal Fang Liu, dkk pada tahun 2017 yang dimana dapat ditemui kekurangan dalam penentuan variable penelitian mengenai penambahan nanopartikel yang digunakan yaitu pada rentang yang cukup jauh. Sehingga, analisis data yang dilakukan menjadi kurang optimal dan juga memungkinkan terdapatnya *error* dalam hasil analisis. Selain itu, pada jurnal yang diteliti oleh Garima Tripathi dan Deepak Srivastava pada tahun 2007 juga terdapat beberapa kekurangan seperti pada data yang hanya mencantumkan grafik Kekuatan Tarik dan Kekuatan lentur pada persentase penambahan partikel saja sehingga pada penelitiannya tidak terdapat data kuantitatif dari Kekuatan Tarik dan Kekuatan lentur. Hal ini menyebabkan terjadinya kesulitan dalam menganalisis data-data penelitian yang telah dilakukan.

4.6 Komparasi Morfologi dan Sifat Mekanik Nanokomposit

Pada tinjauan kali ini telah dibandingkan data morfologi permukaan material yang ada pada masing-masing penambahan nanopartikel serta sifat mekanik yang ditinjau (kekuatan Tarik, kekuatan tekan, dan kekutan lentur). Komparasi data morfologi dari nanokomposit polimer epoksi ditunjukkan oleh Tabel 4.18 dan

komparasi dari sifat mekanik nanokomposit ditunjukkan oleh Tabel 4.19.

Tabel 4.18 Perbandingan sifat morfologi nanokomposit

Material	Komparasi morfologi
Epoksi/Nanosilika	Komposisi optimal 0 – 10 % Bentuk Partikel Isotropic Ukuran partikel 5 – 20 nm Interaksi partikel-partikel tidak baik Interaksi partikel-matriks sangat baik
Epoksi/Halloysite	Komposisi optimal 0 – 10 % Bentuk Partikel Anisotropic Ukuran partikel 10 – 70 nm Persebaran partikel secara parsial Eksfoliasi Interaksi partikel-partikel cukup baik Interaksi partikel-matriks cukup baik
Epoksi/Montmorillonite Nanoclay	Komposisi optimal 0 – 6 % Bentuk Partikel Anisotropic Ukuran partikel 1 – 200 nm Persebaran partikel secara Interkalasi Interaksi partikel-partikel cukup baik Interaksi partikel-matriks tidak baik
Epoksi/MWCNT	Komposisi optimal 0 – 2 % Bentuk Partikel Anisotropic Ukuran partikel 15 – 25 nm Interaksi partikel-partikel cukup baik Interaksi partikel-matriks sangat baik
Epoksi/CTBN Liquid Rubber	Komposisi optimal 0 – 5 % Bentuk Partikel Anisotropic Berat molekul 3500 Interaksi partikel-partikel sangat baik Interaksi partikel-matriks tidak baik

Tabel 4.19 Perbandingan sifat mekanik nanokomposit

Material	Peningkatan Kekuatan Tarik	Peningkatan Kekuatan Tekan	Peningkatan Kekuatan Lentur
Epoksi/Nanosilika	72.12 %	3.59 %	45.1 %
Epoksi/Halloysite	39.86 %	2.02 %	59.21 %
Epoksi/ Montmorillonite *Nanoclay*	5.26 %	1.18 %	3.85 %
Epoksi/MWCNT	38.81 %	25.9 %	39.7 %
Epoksi/CTBN *Liquid Rubber*	2.28 %	3.70 %	0 %

Material komposit polimer epoksi yang ditambahkan dengan nanopartikel menunjukkan peningkatan nilai sifat mekanik dengan komposisi penambahan optimal yang bervariasi. Peningkatan kekasaran permukaan material akibat dari interaksi yang terjadi antara partikel dan matriks menjadi hal penting. Pada penambahan partikel halloysite, dapat ditemukan persebaran material secara eksfoliasi parsial yang dimana dapat mengoptimalkan pengaruh penambahan nanopartikel menjadi lebih baik seperti pada nilai kekuatan lenturnya. Bentuk nanopartikel yang termodifikasi menjadi peran penting dalam peningkatan sifat mekanik yang lebih efektif. Penambahan partikel MWCNT dengan bentuk *nanotubes* menunjukkan peningkatan yang lebih seragam pada ketiga sifat yang ditinjau dengan nilai peningkatan yang signifikan bila dibandingkan pada penambahan jenis nanopartikel dengan bentuk *platelets* dan *soft*. Penambahan partikel nanosilika menunjukkan hasil yang paling baik pada kekuatan tarik yang ditunjukkan pada data hasil penelitian, namun nilai tersebut dipercaya masih belum mencapai optimal. Peningkatan nilai secara signifikan dapat diperoleh dengan melakukan modifikasi terhadap bentuk partikel nanosilika dikemudian hari.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari pembahasan jurnal epoksi/nanosilika, epoksi/halloysite, epoksi/montmorillonite nanoclay, epoksi/*multi-walled carbon nanotubes* (MWCNT), dan epoksi/CTBN *Liquid rubber* yang telah di lakukan adalah sebagai berikut.

1. Dari 5 jenis nanopartikel yang ditambahkan kedalam polimer epoksi didapatkan hasil pengaruh jenis nanopartikel terhadap morfologi material nanokomposit yaitu:
    a. Nanosilika dapat meningkatkan kekasaran permukaan dan *mechanical adhesion* dari nanokomposit. *Micro crack* semakin banyak terbentuk pada penambahan yang melebihi kadar optimum.
    b. Halloysite dapat meningkatkan kekasaran permukaan dan *mechanical adhesion* dari nanokomposit. *Cluster* partikel terbentuk pada penambahan yang melebihi kadar optimum.
    c. Montmorillonite *nanoclay* dapat meningkatkan kekasaran permukaan dan *mechanical adhesion* dari nanokomposit. Distribusi partikel terjadi secara interkalasi. Aglomerasi partikel terbentuk pada penambahan yang melebihi kadar optimum.
    d. MWCNT dapat meningkatkan kekasaran permukaan dan *mechanical adhesion* dari nanokomposit. Aglomerasi partikel terbentuk pada penambahan yang melebihi kadar optimum.
    e. CTBN *liquid rubber* dapat meningkatkan kekasaran permukaan dan *mechanical adhesion* dari nanokomposit. Aglomerasi partikel terbentuk pada penambahan CTBN *liquid rubber*.
2. Dari 5 jenis nanopartikel yang ditambahkan kedalam polimer epoksi didapatkan hasil pengaruh jenis nanopartikel terhadap sifat mekanik material nanokomposit sebagai berikut:

a. Nanosilika yang ditambahkan pada epoksi mampu meningkatkan nilai kekuatan tarik, kekuatan tekan, dan kekuatan lentur dari material nanokomposit pada rentang penambahan 0 – 10 %.
b. Halloysite yang ditambahkan pada epoksi mampu meningkatkan nilai Kekuatan Tarik, kekuatan tekan, dan kekuatan lentur dari material nanokomposit pada rentang penambahan 0 – 10 %.
c. Montmorillonite *nanoclay* yang ditambahkan pada epoksi mampu meningkatkan nilai kekuatan tarik, kekuatan tekan, dan kekuatan lentur dari material nanokomposit pada rentang penambahan 0 – 6 %.
d. MWCNT yang ditambahkan pada epoksi mampu meningkatkan nilai tekuatan tarik, kekuatan tekan, dan kekuatan lentur dari material nanokomposit pada rentang penambahan 0 – 2 %.
e. CTBN *liquid rubber* yang ditambahkan pada epoksi mampu meningkatkan nilai kekuatan tarik dan kekuatan tekan pada rentang penambahan 0 – 5 %. Namun, tidak pada kekuatan lentur dari material nanokomposit.

3. Dari 5 jenis nanopartikel yang ditambahkan ke dalam polimer epoksi didapatkan bahwa jenis dan bentuk nanopartikel dengan potensi dan keoptimalan yang lebih baik pada peningkatan nilai kekuatan tarik yaitu (*spherical*) nanosilika sebesar 72.12%, nilai kekuatan tekan yaitu (*nanotubes*) *Multi-walled carbon nanotubes* (MWCNT) sebesar 25.90%, dan nilai kekuatan lentur yaitu (*nanotubes*) halloysite yaitu sebesar 59.21%. Oleh karena itu, penambahan jenis nanopartikel *spherical* dan *nanotubes* dinilai lebih baik dibandingkan dengan jenis nanopartikel *platelets* dan *soft* pada sifat mekanik dari material nanokomposit terutama pada sifat tarik, tekan, dan lentur.

5.2 Saran

Saran dari hasil penulisan review ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan penelitian lebih lanjut terhadap perilaku eksfoliasi dan interkalasi dari nanopartikel terhadap peningkatan sifat mekanik dari material nanokomposit.
2. Melakukan penelitian lebih lenjut terhadap rekayasa morfologi pada bentuk partikel yang lebih efektif terhadap peningkatan sifat mekanik dari material nanokomposit.
3. Melakukan penelitian lebih lanjut mengenai potensi jenis nanopartikel *platelets* dan *soft* terhadap peningkatan sifat ketahanan impak dari nanokomposit.

(*halaman ini sengaja dikosongkan*)

DAFTAR PUSTAKA

Aasly, Kurt, Terje Malvik, dan E. H Myrhaug. 2007. "Advanced Methods to Characterize Thermal Properties of quartz." **researchgate**.

Alsagayar, Zyad Salem, Abdul Razak Rahmat, Agus Arsad, dan Siti Noor Hidayah. 2015. "Tensile and Flexural Properties of Montmorillonite Nanoclay Reinforced Epoxy Resin Composites." **Advanced Materials Research Vol 1112** 373-376.

Anandhan, dan Sulait Bandyopadhyay. 2011. **Nanocomposites and Polymers with Analytical Methods**. India: Intechopen.

Ates, Murat, Aysegul Akdogan Eker, dan Bulent Eker. 2017. "Carbon nanotube-based nanocomposites and their applications." **Journal of Adhesion Science and Technology Volume 31**.

Azom. 2001. **Nanocomposites Properties and Applications**. 27 September. Diakses Juni 7, 2020. https://www.azonano.com.

—. 2001. **Silica Silicon Dioxide (SiO2)**. 13 December. Diakses April 17, 2020. https://www.azonano.com.

Azonano. 2013. "MultiWalled Carbon Nanotubes: Production, Analysis, and Application." 1-4.

Bhattacharya, Sati N, Musa R Kamal, dan Rahul K Gupta. 2008. **Polymeric Nanocomposites, Theory and Practice**. Melbourne: Hanser.

Biro Klasifikasi Indonesia. 2014. "Rules for non-metalic materials volume 14." Dalam **Rules for the classification and construction part 1. Seagoing ships**. Jakarta.

Callister, William. 2006. **Materials Science and Engineering, An Introduction 7th Edition**. Utah: John Wiley & Sons, Inc.

Chen, Pascault, Bertsch, Drake, dan Siebert. 1994. "Synthesis, Characterization, and Properties of Reactive Liquid

Rubbers Based on Butadiene-Acrylonitrile Copolymers." **Journal of Applied Polymer Science, Vol. 51**.

Constantinescu, Dan, Dragos Apostol, Catalin Picu, Krzysztof Krawczyk, dan Manfred Sieberer. 2017. "Mechanical Properties of epoxy nanocomposites reinforced with functionalized silica nanoparticles ." **Procedia Structural Integrity volume 5, 2nd International Conference on Structural Integrity, ICSI 2017** 647-652.

De Francisci, Gabriela, dan Zhi Ming Chen. 2012. "Impact Damage Formation on Composite Aircraft Structures."

Deng, Shiqiang, Jianing Zhang, Lin Ye, dan Jingshen Wu. 2008. "Toughening epoxies with halloysite nanotubes." **Polymer** 5119–5127.

Dong Ma, Zheng, Dongying Jiang, Yushun Cui, dan Yuanyuan Liu. 2009. "The Development of Nanoclay-Epoxy Composite for Application in Ballistic Protection." **SAE Technical Papers**.

El Khoury, Diana. 2017. "Towards the use of Electrostatic Force Microscopy to study interphases in nanodielectric materials." **Researchgate** 119.

Frank, Jean. 2014. **Manufacturing Methods of Composite Materials**.

Gaaz, Tayser Sumer, Abu Bakar Sulong, Abdul Amir Kadhum, Mohamed Nassir, dan Ahmed Al-Amiery. 2016. "Impact of Sulfuric Acid Treatment of Halloysite on Physico-Chemic Property Modification." **Materials** 620.

Gibson, Ronald. 1994. **Principles of Composite Material**. New York: McGraw-Hill Inc.

Golubevaa, Yu, Yu Ul'yanova, Kostyreva, Drozdova, dan Mokeev. 2013. "Synthetic Nanoclays with the Structure of Montmorillonite: Preparation, Structure, and PhysicoChemical Properties." **Glass Physics and Chemistry volume 39** 533-539.

Ho, Man-Wai, Chun-Ki Lam, Kin-Tak Lau, Dickon, dan David Hui. 2006. "Mechanical properties of epoxy-based

composites using nanoclays." **Composite Structures 75** 415–421.

Jeon, Haeri, Jin Hwan Park, dan Minyoung Shon. 2013. "Corrosion protection by epoxy coating containing multi-walled carbon nanotubes." **Journal of Industrial and Engineering Chemistry 19(3)** 849–853.

Jin, Fan-Long, Xiang Li, dan Soo-jin Park. 2015. "Synthesis and application of epoxy resins: A review." **Journal of Industrial and Engineering Chemistry** 1-11.

Jumahat, Aidah, Costas Soutis, Jamaluddin Mahmud, dan Nurulnatisya Ahmad. 2012. "Compressive properties of nanoclay/epoxy nanocomposites ." **Procedia Engineering volume 41, International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors** 1607 – 1613.

Kamble, Ravindra, Manasi Ghag, Sheetal Gaikawad, dan Bijoy Kumar Panda. 2012. "Halloysite Nanotubes and Applications: A Review." **Journal of Advanced Scientific Research, vol 3(2)** 25-29.

Kaynak, Cevdet, A Ozturk, dan T Tincer. 2002. "Flexibility improvement of epoxy resin by liquid rubber modification." **Polymer International 51(9)** 749–756.

Khan, Waseem, Rahul Sharma, dan Parveen Saini. 2016. "Synthesis, Properties and Applications." Dalam **Carbon Nanotube-Based Polymer Composites**, 1-46. Licensee InTech.

Koo, Joseph. 2006. **Polymer nanocomposite: Processing, characterization, and application**. New York: McGraw-Hill.

Lassalle, Veronica, dan Mariela Agotegaray. 2017. **Silica-coated Magnetic Nanoparticles**. Bahía Blanca: Springer.

Liu, Fang, Shiqiang Deng, dan Jianing Zhang. 2017. "Mechanical Properties of Epoxy and Its Carbon Fiber Composites Modified by Nanoparticles." **Journal of Nanomaterials** 1-9.

Liu, J, W.-J Boo, Abraham Clearfield, dan H.-J Sue. 2006. "Intercalation and Exfoliation: A Review on Morphology of Polymer Nanocomposites Reinforced by Inorganic Layer Structures." **Materials and Manufacturing Processes Volume 21 (2)** 143-151.

Lloyid Register. 2018. **Rules for the Manufacture, Testing and Certification of Materials**. London: Lloyd's Register Group.

Massingil, John, dan Bauer. 2000. "Epoxy Resins; Applied Polymer Science 21st Century." 393-424.

Montazeri, Arash, Jafar Javadpour, Alireza Khavandi, Abbas Tcharkhtchi, dan Ali Mohajeri. 2010. "Mechanical properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites." **Materials and Design volume 31** 4202–4208.

Nicoletto, Demis Boschetti, Mauro Giorcelli, dan Patrizia Savi. 2015. "MWCNTs nanocomposites for space applications."

Ravichandran, Rathnakar, Santhosh, Chennakeshava, dan Mosharib Ahmad Hashmi. 2019. "Enhancement of mechanical properties of epoxy/halloysite nanotube (HNT) nanocomposites." **SN Applied Sciences**.

Sanyal, Datta, dan Hazra. 2002. "Morphology of nanostructured materials." **Pure Appl. Chem., Vol. 74, No. 9** 1553–1570.

Singh, Priti, Sameer Srivastava, dan Sunil Kumar Singh. 2019. "Nanosilica: Recent Progress in Synthesis, Functionalization, Biocompatibility, and Biomedical Applications." **American Chemical Society** 4882−4898.

Tang, Youhong, dan Lin Ye. 2015. "17 - Nanosilica-reinforced epoxy composites for marine applications." Dalam **Fillers and Reinforcements for Advanced Nanocomposites**, oleh Youhong Tang dan Lin Ye, 425-459. Adelaide: Elsevier Ltd.

Thomas, Sabu, prof. Christophe Sinturel, dan Prof. Raju Thomas. 2014. **Micro-and Nanostructured Epoxy/Rubber Blends**. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.

Tripathi Garima, dan Deepak Srivastava. 2007. "Effect of carboxyl-terminated poly(butadiene-co-acrylonitrile) (CTBN) concentration on thermal and mechanical properties of binary blends of diglycidyl ether of bisphenol-A (DGEBA) epoxy resin." **Materials Science and Engineering** (Elsevier Ltd) A 443: 262–269.

Uddin, Faheem. 2008. "Clays, Nanoclays, and Montmorillonite Minerals." **Metallurgical and Materials Transactions A Volume 39(12)**.

Vijayan, Poornima, Debora Puglia, Hari Krishnan, dan Jose Kenny. 2015. "Solvent Uptake of Liquid Rubber Toughened Epoxy/Clay Nanocomposites." **Advances in Polymer Technology volume 35**.

Vijayan, Poornima, Yara Mohamed Hany El-Gawady, dan Mariam Ali Al-Maadeed. 2016. "Halloysite Nanotube as Multifunctional Component in Epoxy Protective Coating." **Industrial & Engineering Chemistry Research, 55(42)** 11186–11192.

Xiao, Chufan, Yefa Tan, Xupu Yang, Ting Xu, Lulu Wang, dan Zehao Qi. 2018. "Mechanical properties and strengthening mechanism of epoxy resin reinforced with nano-SiO2 particles and multi-walled carbon nanotubes." **Chemical Physics Letters** 34-43.

Yang, Huaming, Yi Zhang, dan Jing Ouyang. 2016. "Chapter 4 - Physicochemical Properties of Halloysite." Dalam **Structure and Properties of Nanosized Tubular Clay Minerals Halloysite and Imogolite volume 7**. Changsa: Elsevier Ltd.

Zarasvand, Kamran Alasvand, dan Hossein Golestanian. 2017. "Effects of Nanotube/Matrix Interface on Multi-Walled Carbon Nanotube Reinforced Polymer Mechanical Properties." **Mechanics of Advanced Composite Structures** 211-223.

Zhang, Jianing: Deng, Shiqiang, Yulong Wang, dan Lin Ye. 2016. "Role of rigid nanoparticles and CTBN rubber in the

toughening of epoxies with different cross-linking densities." **Composites: Part A volume 80** 82-94.

Zhang, Yi, Aidong Tang, Huaming Yang, dan Jing Ouyang. 2015. "Applications and interfaces of halloysite nanocomposites." **Applied Clay Science**.

LAMPIRAN

Lampiran data kuantitatif pada beberapa jurnal mengenai nilai sifat mekanik dari material nanokomposit yang diperkuat oleh nanopartikel.

a. Tabel data sifat mekanik material epoksi/nanosilika

Sifat Tarik Epoksi/Nanosilika (Xiao dkk, 2018)

Filler type	*Weight fraction*	*Tensile strength* (MPa)	*Elastic modulus* (MPa)
Neat Epoxy		37.62 ± 0.32	2108.54 ± 22.73
Silika	1%	53.16 ± 0.38	2451.32 ± 22.21
	2%	62.03 ± 0.33	2437.93 ± 13.13
	3%	64.75 ± 0.30	2656.98 ± 10.34
	4%	57.59 ± 0.94	2095.70 ± 11.42

Sifat Tarik Epoksi/Nanosilika (Liu dkk, 2017)

Filler type	*Weight fraction*	*Tensile strength* (MPa)	*Tensile modulus* (GPa)
Neat Epoxy		65.80 ± 1.90	2.94 ± 0.10
Silika	10%	69.00 ± 0.50	3.36 ± 0.12

Sifat Tarik epoksi/nanosilika (Constantinescu dkk, 2017)

Filler type	*Weight fraction*	*Tensile strength* (MPa)	*Elastic modulus* (MPa)
Neat Epoxy		71.37	3471
Silika	0.3%	83.02	3526
	1%	85.74	3633
	3%	85.02	3438

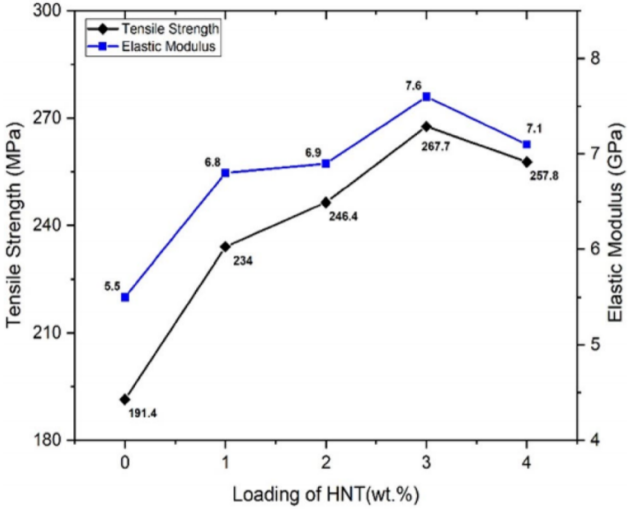
Sifat Tekan Epoksi/Nanosilika (Liu dkk, 2017)

Filler type	*Weight fraction*	*Compressive strength* (MPa)	*Compressive modulus* (GPa)
Neat Epoxy		89.1 ± 1.2	2.62 ± 0.05
Silika	2%	91.6 ± 0.4	2.63 ± 0.02
	4%	91.5 ± 0.2	2.55 ± 0.03
	6%	91.9 ± 0.5	2.46 ± 0.05
	8%	92.3 ± 0.3	2.58 ± 0.03
	10%	91.1 ± 0.2	2.71 ± 0.02

Sifat Lentur Epoksi/nanosilika (Xiao dkk, 2018)

Filler type	*Weight fraction*	*Flexural strength* (MPa)	*Elastic modulus* (MPa)
Neat Epoxy		59.2 ± 0.50	2108.54 ± 22.73
Silika	1%	62.1 ± 0.52	2451.32 ± 22.21
	2%	67.6 ± 0.36	2437.93 ± 13.13
	3%	85.9 ± 0.46	2656.98 ± 10.34
	4%	60.0 ± 0.32	2095.70 ± 11.42

b. Tabel data sifat mekanik material epoksi/halloysite



Sifat Tarik Epoksi/Halloysite (Ravichandran dkk, 2019)

Sifat Tarik Epoksi/Halloysite (Liu dkk, 2017)

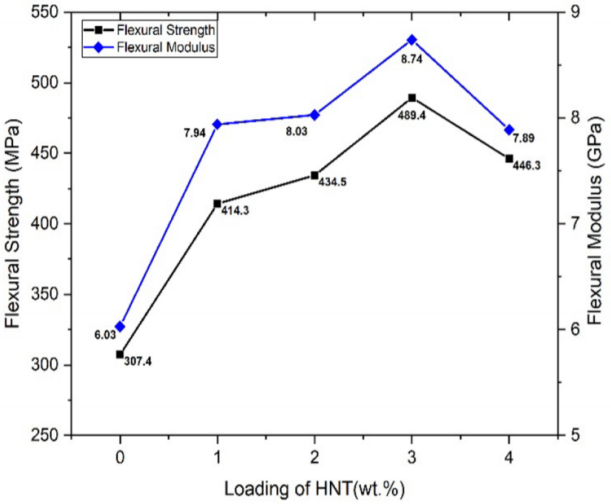
Filler type	*Weight fraction*	*Tensile strength* (MPa)	*Tensile modulus* (GPa)
Neat Epoxy		65.80 ± 0.19	2.94 ± 0.10
Halloysite	5%	68.10 ± 0.30	3.03 ± 0.13
	10%	68.20 ± 0.40	3.11 ± 0.08

Sifat Tarik Epoksi/Halloysite (Deng dkk, 2008)

Filler type	*Weight fraction*	*Tensile strength* (MPa)	*Tensile modulus* (GPa)
Neat Epoxy		62.60 ± 0.60	2.90 ± 0.12
Halloysite	5%	67.30 ± 2.00	2.93 ± 0.09
	10%	67.40 ± 1.90	2.98 ± 0.10

Sifat Tekan Epoksi/Halloysite (Liu dkk, 2017)

Filler type	*Weight fraction*	*Compressive strength* (MPa)	*Compressive modulus* (GPa)
Neat Epoxy		89.1 ± 1.2	2.62 ± 0.05
Halloysite	2%	90.8 ± 0.2	2.43 ± 0.05
	5%	89.3 ± 0.3	2.40 ± 0.01
	7%	90.9 ± 0.2	2.55 ± 0.03
	10%	90.4 ± 0.1	2.49 ± 0.01
	15%	91.3 ± 0.2	2.58 ± 0.03



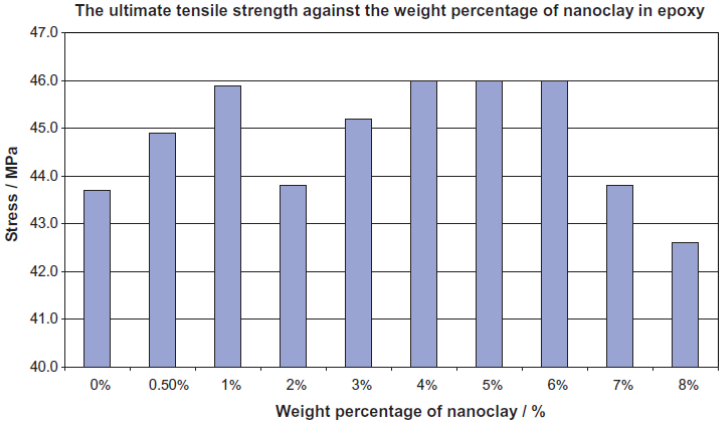
Sifat Lentur Epoksi/Halloysite (Ravichandran dkk, 2019)

Sifat Lentur Epoksi/Halloysite (Deng dkk, 2008)

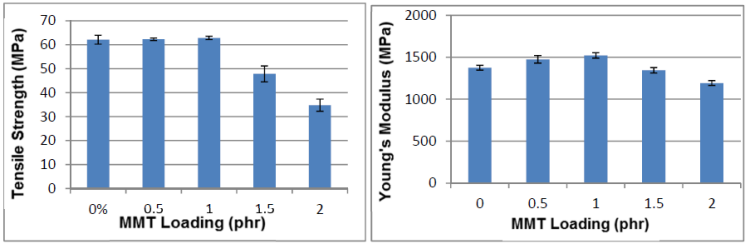
Filler type	*Weight fraction*	*Flexural strength* (MPa)	*Tensile modulus* (GPa)
Neat Epoxy		111.0 ± 2.5	3.05 ± 0.04
Halloysite	5%	116.0 ± 4.5	3.39 ± 0.06

10%	120.3 ± 1.7	3.59 ± 0.08

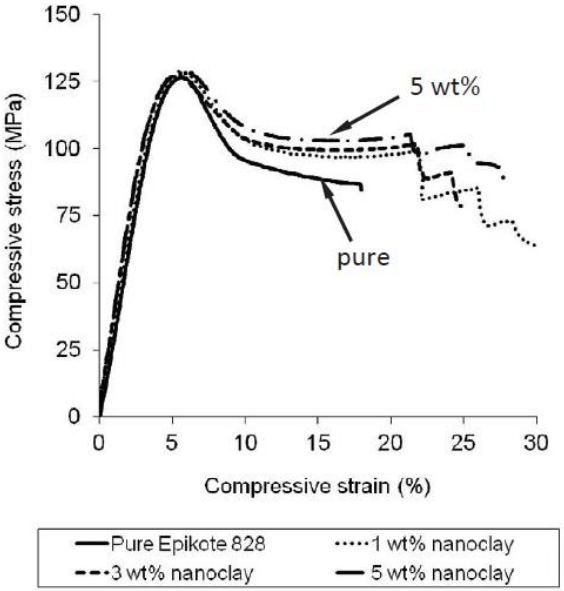
c. Tabel data sifat mekanik material Epoksi/Montmorillonite nanoclay.



Sifat Tarik epoksi/Montmorillonite nanoclay (Ho dkk, 2006)



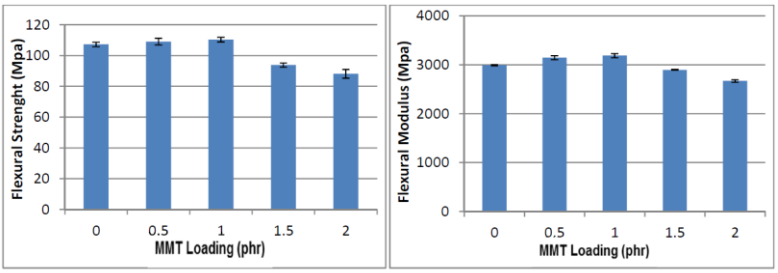
Sifat Tari*k* epoksi/Montmorillonite nanoclay (Alsagayar dkk, 2015)



Sifat Tekan Epoksi/Montmorillonite nanoclay (Jumahat dkk, 2012)

Sifat Tekan Epoksi/Montmorillonite nanoclay (Jumahat dkk, 2012)

Filler type	*Weight fraction*	*Flexural strength* (MPa)	*Elastic modulus* (GPa)
Neat Epoxy		126.59 ± 0.39	3.12 ± 0.06
Montmorillonite nanoclay	1%	127.94 ± 0.18	3.27 ± 0.01
	3%	127.78 ± 0.27	3.45 ± 0.01
	5%	128.08 ± 0.27	3.58 ± 0.01



(a) (b)

Sifat Lentur material Epoksi/Montmorillonite nanoclay (a) Kekuatan lentur (b) Modulus Lentur (Alsagayar dkk, 2015)

d. Tabel data sifat mekanik material Epoksi/MWCNT

Sifat Tarik Epoksi/MWCNT (Montazeri dkk, 2010)

Filler type	*Weight fraction*	*Tensile strength* (MPa)	*Young modulus* (MPa)
Neat Epoxy		64	3430
MWCNT	0.1%	67	3458
	0.5%	69	3705
	1%	71	3951
	1.5%	74	4138
	2%	75	4225
	3%	71	4365

Sifat Tarik Epoksi/MWCNT (Xiao dkk, 2018)

Filler type	*Weight fraction*	*Tensile strength* (MPa)	*Elastic modulus* (MPa)
Neat Epoxy		37.62 ± 0.32	2108.02 ± 22.73
MWCNT	0.5%	52.22 ± 0.35	2565.72 ± 27.66
	1%	51.30 ± 0.45	2232.06 ± 13.06
	1.5%	48.02 ± 0.41	2214.88 ± 12.88

Sifat Tarik Epoksi/MWCNT (Zarasvand dan Golestanian, 2017)

Filler type	*Weight fraction*	*Tensile strength* (MPa)	*Elastic modulus* (MPa)
Neat Epoxy		39.77 ± 0.88	1880.7 ± 420
MWCNT	0.15%	41.44 ± 1.50	1932.6 ± 700
	0.25%	44.82 ± 1.20	2077.3 ± 520
	0.35%	47.54 ± 1.70	2137.6 ± 860
	0.45%	48.11 ± 0.63	2230.4 ± 340
	0.55%	51.03 ± 2.20	2268.1 ± 110

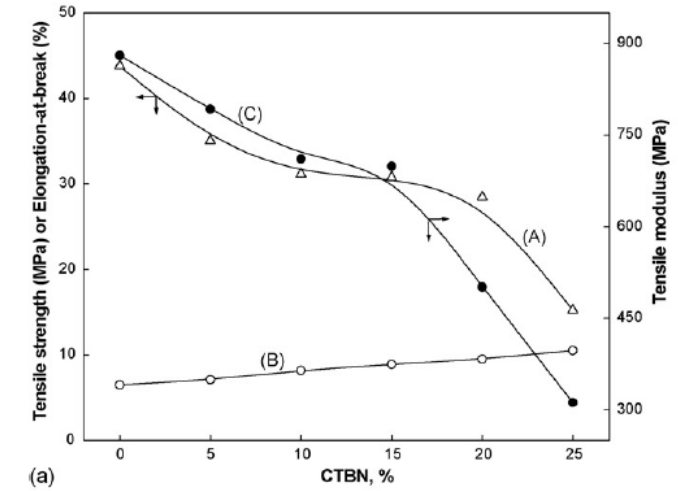
Sifat Tekan Epoksi/MWCNT (Zarasvand dan Golestanian, 2017)

Filler type	*Weight fraction*	*Tensile strength* (MPa)	*Elastic modulus* (MPa)
Neat Epoxy		105.3 ± 3.9	897.15±35
MWCNT	0.15%	109.7 ± 5.4	930.02±54
	0.25%	116.6 ± 4.6	950.23±38
	0.35%	117.0 ± 5.1	956.94±44
	0.45%	129.9 ± 6.5	988.16±64
	0.55%	132.0 ± 5.7	962.00±65

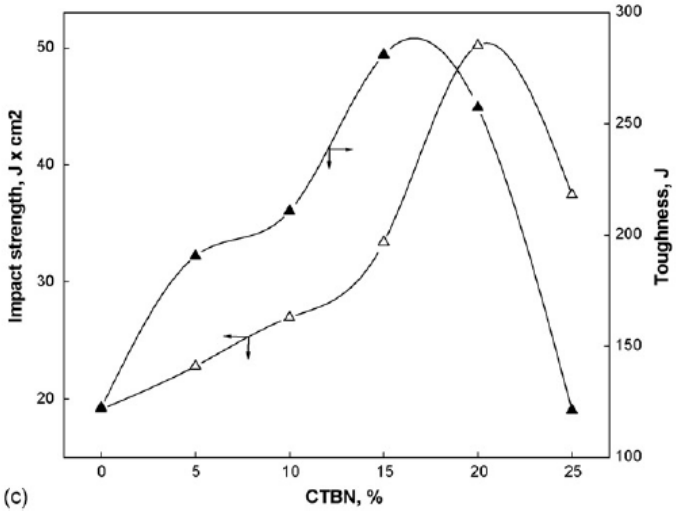
e. Tabel data sifat mekanik material Epoksi/CTBN *Liquid rubber*

Sifat Tarik Epoksi/CTBN *Liquid rubber* (Zhang dkk, 2017)

Filler type	*Weight fraction*	*Compressive strength* (MPa)	*Compressive modulus* (GPa)
Neat Epoxy		65.8 ± 1.9	2.94 ± 0.10
CTBN	5%	67.3 ± 0.7	2.09 ± 0.10
	10%	60.1 ± 1.0	2.61 ± 0.10



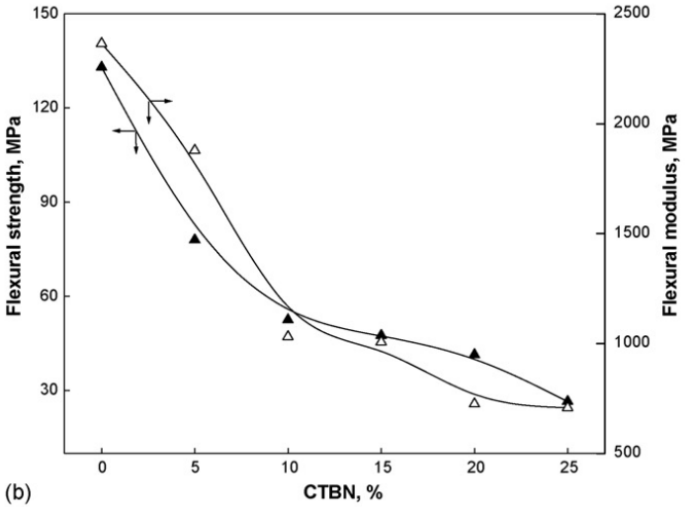
Sifat Tarik Epoksi/CTBN *Liquid rubber* (Tripathi dan Srivastava, 2007)



Sifat Impak Epoksi/CTBN *Liquid rubber* (Tripathi dan Srivastava, 2007)

Sifat Tekan Epoksi/CTBN *Liquid rubber* (Liu dkk, 2017)

Filler type	*Weight fraction*	*Compressive strength* (MPa)	*Compressive modulus* (GPa)
Neat Epoxy		89.1± 1.2	2.62 ± 0.05
CTBN	5%	92.4 ± 0.6	2.61 ± 0.03
	10%	89.3 ± 0.5	2.42 ± 0.06



Sifat Lentur epoksi/CTBN *Liquid rubber* (Tripathi dkk, 2007)

BIODATA PENULIS

Penulis lahir di Tembilahan pada 26 Januari 1999. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara yang merupakan anak dari pasangan Hamdi dan Desrina N. Riwayat Pendidikan yang telah ditempuh oleh penulis yaitu SD Negeri 009 Tembilahan Hulu, SMP Negeri 1 Tembilahan Hulu, SMA Negeri Plus Provinsi Riau, dan sekarang melanjutkan Studi di Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Selama berkuliah, penulis telah banyak mengikuti berbagai macam kegiatan kampus diantaranya yaitu Seminar Pasca kampus, Pelatihan Kepemimpinan dan Pengorganisasian, Staff Divisi Desain Tim Kawal ITS periode 2017, staff Departemen Komunikasi dan Informasi BEM FTIRS ITS periode 2017-2018, dan Kepala Departemen Komunikasi dan Informasi BEM FTIRS ITS periode 2018-2019. Selain itu, Penulis juga berkesempatan menjadi Koordinator mahasiswa di Laboratorium Inovasi material pada periode 2019-2020 dan merintis sebuah klub keilmiahan pada tahun 2018 yang bernama Materials Research Club.

Penulis memiliki pengalaman meneliti pada bidang material bahan bangunan pada proyek TMLEnergy "Green challenge" tahun 2018 dan bidang tribologi pada Think Efficiency tahun 2019. Penulis juga memiliki pengalaman Kerja Praktik di PT. Antam UBPN Sulawesi tenggara pada bulan Juni-Juli 2019. Pada saat Kerja Praktik penulis menganalisis topik bagian pemurnian logam yaitu "Solusi pencegahan terhadap penumpukan logam Ferronikel yang terjadi pada *ladle furnace*". Tugas akhir yang dikerjakan oleh penulis sendiri berjudul "Tinjauan potensi nanopartikel terhadap morfologi dan sifat mekanik pada komposit polimer epoksi"

email: andrifauziii@gmail.com