

## Studi Awal Pembuatan *Polymer Matrix Composite* (PMC) Epoksi yang Didoping Nanopartikel ZnO sebagai Material Antibakteri

Manty Aldilani Ikaningsih<sup>1</sup>, Ghazi Alwan Rafi<sup>1</sup>, dan Djoko Hadi Prajitno<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Metalurgi, Fakultas Teknologi Manufaktur, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi – Bandung, Indonesia

<sup>2</sup>Pusat Sains dan Teknologi Nuklir Terapan (PSTNT) Batan, Bandung, Indonesia

[manty.aldilani@lecture.unjani.ac.id](mailto:manty.aldilani@lecture.unjani.ac.id), [ghazyalwan12@gmail.com](mailto:ghazyalwan12@gmail.com), [djokohp@batan.go.id](mailto:djokohp@batan.go.id)

### Abstrak

Bakteri yang menempel dan menumpuk di sikat gigi dapat mengakibatkan timbulnya infeksi atau penyakit dalam rongga mulut. Oleh karena itu, material antibakteri mulai banyak diteliti untuk menghambat pertumbuhan bakteri, bahkan membunuh bakteri. Pada penelitian ini dilakukan studi awal mengenai *polymer matrix composite* (PMC) dengan matriks epoksi yang didoping dengan nanopartikel ZnO sebagai material antibakteri pada sikat gigi. Matriks epoksi, *hardener* dan nanopartikel ZnO dicampur hingga homogen dan selanjutnya dicetak seperti sikat gigi. Perbandingan resin dan *hardener* divariasikan 1R:1H dan 2R:1H dengan variasi jumlah nanopartikel ZnO sebesar 0%; 0,6% dan 0,9%. Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD), kekerasan, *Fourier Transform Infra-Red* (FTIR) dan bending dilakukan untuk mengetahui karakteristik PMC yang dihasilkan. Nilai kekerasan dari PMC dengan doping nanopartikel ZnO 0%; 0,6% dan 0,9% berturut-turut adalah 55,6; 58,5; 60,5 untuk 1R:1H dan 73,3; 74,3; 74,8 untuk 2R:1H. Berdasarkan data hasil pengujian didapat bahwa nilai kekerasan semakin tinggi seiring dengan meningkatnya jumlah nanopartikel ZnO dan jumlah resin yang digunakan. Untuk pengujian sifat antibakteri, penambahan jumlah nanopartikel ZnO mengakibatkan peningkatan sifat antibakteri dari PMC.

Kata kunci: antibakteri, epoksi, nanopartikel ZnO, *polymer matrix composite* (PMC)

### Abstract

Bacteria that stick to and accumulate on the toothbrush can cause infection or disease in the oral cavity. Therefore, many antibacterial materials are being researched to inhibit bacterial growth, even kill bacteria. In this preliminary research, polymer matrix composite with an epoxy matrix doped with ZnO nanoparticles was carried out as an antibacterial material on toothbrushes. The epoxy matrix, hardener, and ZnO nanoparticles are mixed until they are homogeneous and then printed like a toothbrush. The ratio of resin and hardener varied 1R:1H and 2R:1H with variations of ZnO are 0%; 0.6% and 0.9%. XRD, hardness, FTIR, and bending tests have been carried out to determine the characteristics of PMC. The hardness of PMC with ZnO 0%; 0.6%; 0.9% respectively are 55.6; 58.5; 60.5 for 1R:1H and 73.3; 74.3; 74.8 for 2R:1H. Testing for antibacterial properties using a spectrophotometer with the optical density method was carried out to determine the antibacterial. The highest antibacterial properties were PMC with ZnO 0.9% 2R:1H. Based on data, it was found that the hardness was getting higher along with the increasing ZnO nanoparticles and the ratio of resin. For testing antibacterial properties, increasing ZnO nanoparticles resulted in an increase in the antibacterial properties.

Keywords: antibacterial, epoxy, ZnO nanoparticle, polymer matrix composite (PMC)

### 1. Pendahuluan

Sikat gigi merupakan suatu alat yang digunakan untuk membersihkan rongga mulut, termasuk gigi dan gusi. Sikat gigi ini sangat mudah terkontaminasi, baik dari dalam rongga mulut maupun dari lingkungan. Bakteri yang menempel dan menumpuk di sikat gigi dapat mengakibatkan penyakit dalam rongga mulut. Akan tetapi, sebagian besar orang meletakkan sikat gigi ke dalam gelas atau memasukkannya ke dalam penutup (pelindung sikat gigi) setelah digunakan. Hal tersebut sangat berpeluang menumbuhkan bakteri dan kuman karena tempatnya yang lembab. Oleh karena itu, para ahli menganjurkan untuk mengganti sikat gigi setidaknya setiap 3-4 bulan sekali.

Dewasa ini, sikat gigi mulai dibuat dari bahan yang mengandung anti bakteri. Beberapa merk bahkan sudah mengeluarkan produk tersebut. Produk ini diharapkan bisa menghambat pertumbuhan bakteri, bahkan membunuh bakteri yang menempel dan menumpuk di sikat gigi.

Gugus fungsi epoksi membentuk ikatan silang melalui mekanisme kondensasi dengan *hardener*. Dengan katalis yang sesuai, seperti boron trifluorida atau amina tersier, epoksi dapat membentuk polimer dengan sendirinya. Epoksi

#### Info Makalah:

Dikirim : 02-16-22;

Revisi 1 : 04-20-22;

Diterima : 04-22-22.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : +62 813-2077-7086

e-mail : [manty.aldilani@lecture.unjani.ac.id](mailto:manty.aldilani@lecture.unjani.ac.id)

merupakan polimer jenis termoset yang memungkinkan adanya penambahan rantai dan terjadinya ikatan silang tanpa eliminasi produk kondensasi, seperti air. Penyusutan material epoksi pun lebih rendah dibandingkan polimer jenis termoset yang lainnya. Kekurangan dari resin epoksi adalah perlunya pemanasan pada material prekursor sebelum diproses. Selain itu, sistem formulasi resin epoksi seringkali

membutuhkan keahlian khusus untuk epoksi dasar dan *hardener* dari pabrik yang berbeda (Gibson, 2017). Resin epoksi memiliki sifat antibakteri, sehingga berpotensi besar digunakan dalam dunia medis dan elektronik. Ada dua metode umum yang digunakan untuk meningkatkan sifat antibakteri dari resin epoksi, yaitu mengubah struktur kimia dan menambahkan agen antibakteri. Diantara kedua metode tersebut, penambahan agen antibakteri adalah metode yang paling efektif (Wu et al., 2020). Beberapa nanopartikel antibakteri yang telah dikembangkan antara lain nanopartikel perak, ZnO, CuO, dan TiO<sub>2</sub> (Chavali & Nikolova, 2019; Droval et al., 2008; Kumar et al., 2017; Prasanna et al., 2019). Kelebihan dari material antibakteri anorganik dibandingkan dengan material antibakteri organik adalah daya tahan yang lebih unggul, toksisitas yang lebih rendah, selektivitas yang lebih besar dan tahan panas (Padmavathy & Vijayaraghavan, 2008).

ZnO merupakan material semikonduktor tipe n, telah dieksplorasi secara luas sebagai agen antimikroba. ZnO bersifat biokompatibel, tidak beracun dan memiliki sifat fotokimia yang stabil. Luas permukaan nanopartikel ZnO berhubungan dengan aktivitas antibakteri. Semakin besar luas permukaan, maka akan meningkatkan sifat antibakteri. Begitupun sebaliknya, luas permukaan yang kecil akan mengurangi sifat antibakterinya (Kumar et al., 2017). Data awal menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO memiliki efek antibakteri yang secara signifikan lebih tinggi pada *Staphylococcus aureus* dibandingkan dengan nanopartikel MgO, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuO dan CeO<sub>2</sub>. Data penelitian menunjukkan nanopartikel ZnO berpotensi sebagai agen bakteriostatik pada sinar tampak dan pengembangan agen turunan untuk mengendalikan penyebaran dan infeksi berbagai jenis bakteri (Jones et al., 2007).

Droval, et al (2008) melakukan pengujian aktivitas antimikroba pada campuran polimer poly(amide) 6 dan LDPE yang ditambahkan dengan ZnO Droval, et al (2008) melakukan pengujian aktivitas antimikroba pada campuran polimer poly(amide) 6 dan LDPE yang ditambahkan dengan ZnO terhadap bakteri *E. coli*, *St. aureus* dan *A. niger*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan nanopartikel ZnO sebesar 1% ke dalam polimer memperlihatkan aktivitas antibakteri yang besar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan nanopartikel ZnO sebesar 1% ke dalam polimer memperlihatkan aktivitas antibakteri yang besar (Droval et al., 2008)..

Hrenovic, et al., 2012 menyelidiki aktivitas antimikroba dari nanopartikel Cu<sub>2</sub>O, ZnO dan NiO yang didukung klinoptilolit alami dalam limbah sekunder dalam kondisi gelap. Setelah 24 jam kontak dengan nanopartikel Cu<sub>2</sub>O dan ZnO, jumlah sel bakteri *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus* dalam kultur murni sebanyak empat hingga enam kali dan menunjukkan aktivitas antibakteri yang konsisten terhadap *E. Coli* setelah 1 jam kontak selama 48 exposure. Aktivitas antibakteri nanopartikel NiO kurang efisien. Nanopartikel oksida dapat diaplikasikan untuk desinfeksi efluen dan penghilangan mikroorganisme patogen pada tahap tersier dalam pengolahan air limbah (Hrenovic et al., 2012).

Azam, et al. 2014 menyelidiki aktivitas antimikroba dari nanopartikel ZnO, CuO dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> terhadap bakteri Gram positif (*Staphylococcus aureus* dan *Bacillus subtilis*) dan Gram negatif (*Escherichia coli* dan *Pseudomonas aeruginosa*). Diantara ketiga nanopartikel tersebut, ZnO menunjukkan aktivitas antimikroba yang tertinggi terhadap kedua jenis bakteri Gram positif dan Gram negatif tersebut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO berpotensi bakterisida terbaik, sedangkan nanopartikel Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> menunjukkan aktivitas bakterisida yang kurang baik. Secara keseluruhan, aktivitas antibakteri secara berurutan: ZnO > CuO > Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Azam et al., 2012).

Bawardi, 2018 dari Institut Pertanian Bogor membuat biofilm dari pati 75anjang dengan penambahan nanopartikel ZnO. Biofilm pati 75anjang yang mengandung nanopartikel ZnO ini dapat digunakan sebagai bahan kemasan makanan dengan sifat antibakteri. Terbukti dari hasil penelitian menunjukkan biofilm dengan 2% ZnO mampu memberikan nilai hambatan sebesar 7,67 mm terhadap bakteri *E. Coli*. Perkiraan masa aktif daya hambatan ZnO terhadap bakteri *E. Coli* yaitu konsentrasi 1% dengan masa aktif 51,97 hari dan 49,97 hari untuk konsentrasi 2%. Sedangkan terhadap *Salmonella sp.* yaitu konsentrasi 1% dengan masa aktif 83,17 hari dan 169,17 hari untuk konsentrasi 2% (Bawardi, 2018).

Pada penelitian ini akan dibuat *polymer matrix composite* (PMC) dengan matriks epoksi yang didoping dengan filler nanopartikel ZnO. PMC ini diharapkan dapat digunakan sebagai material sikat gigi anti bakteri yang dapat membunuh bakteri yang menempel dan menumpuk pada sikat gigi, sehingga mengurangi kemungkinan terjadinya infeksi di dalam mulut. Pengujian yang akan dilakukan adalah pengujian SEM-EDS dan pengujian aktivitas bakteri untuk melihat efektivitas sifat anti bakteri.

## 2. Metode

Material yang digunakan dalam penelitian ini antara lain resin epoksi, serbuk nanopartikel ZnO, *hardener*, dan larutan kaldu. Adapun alat yang digunakan adalah neraca atau timbangan, durometer gelas kimia, batang pengaduk, dan gelas ukur. Matriks epoksi, *hardener* dan serbuk nanopartikel ZnO sebagai *filler* dicampurkan hingga homogen. Perbandingan antara resin epoksi dan *hardener* adalah 1R:1H dan 2R:1H. Serbuk nanopartikel ZnO ditambahkan dengan beberapa variasi, yaitu 0%; 0,6% dan 0,9%. Setelah homogen, campuran tersebut dicetak seperti sikat gigi dan dibiarkan dingin dengan waktu *curing* selama 3 hari. Proses pencampuran dan pendinginan PMC epoksi dengan doping ZnO ini dilakukan pada temperatur kamar.



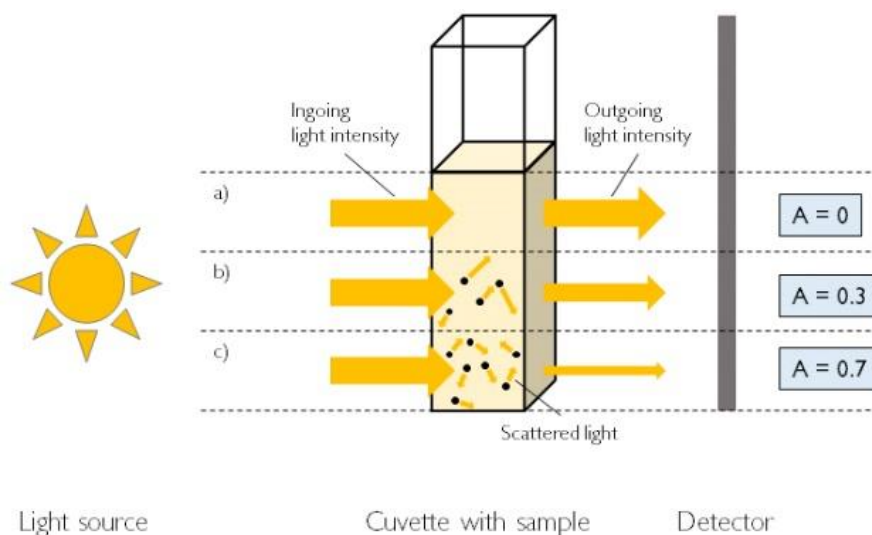
Gambar 1. Bentuk *Polymer Matrix Composite* (PMC)

Dalam penelitian ini dilakukan beberapa pengujian antara lain *X-Ray Diffraction* (XRD), *Fourier Transform Infra-Red* (FTIR), kekerasan dan *bending*. Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk mengidentifikasi komposisi dan ukuran partikel dari serbuk nanopartikel ZnO yang digunakan. Pengujian FTIR dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi dari material PMC yang telah dibuat. Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan dari material PMC yang telah dibuat. Penggunaan kekerasan dilakukan dengan menggunakan durometer *type D* dengan indenter berbentuk kerucut.

Pengujian *bending* dilakukan untuk mengukur kekuatan bending dari material PMC yang telah dibuat. Pengujian dilakukan di Laboratorium Pengembangan Paduan dan Karakterisasi Institut Teknologi Bandung. Pengujian *bending* ini dilakukan dengan menggunakan mesin uji *bending* merk Hung Ta yang dilengkapi dengan data tambahan berupa data uji tarik. Berdasarkan standar ASTM D790-03, perhitungan modulus elastisitas *bending* menggunakan rumus berikut: (ASTM INTERNATIONAL, 2002)

(1)

Pengujian antibakteri dilakukan untuk mengidentifikasi sifat antibakteri dari PMC yang telah dibuat. Pengujian antibakteri ini dilakukan dengan metode *optical density*. Pada metode *optical density* ini, *optical density* dari suatu medium diukur dalam kurun waktu tertentu untuk mengetahui pertumbuhan bakteri dalam medium tersebut. Pengujian dengan metode *optical density* ini cukup sederhana karena tidak ada penambahan zat kimia ataupun proses khusus (Kumar et al., 2017). Pengukuran nilai *optical density* dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis dilakukan pada panjang gelombang 600 nm.



Gambar 2. Prinsip Pengukuran Metode *Optical Density* (a) tanpa bakteri; (b) densitas bakteri rendah; (c) densitas bakteri tinggi (HT, 2020)

Medium pertumbuhan bakteri yang digunakan dalam penelitian ini berupa larutan. Selanjutnya PMC yang telah dibuat dicelupkan ke dalam larutan kaldu tersebut untuk mengidentifikasi sifat antibakteri dari PMC. Selama masa inkubasi, kekeruhan larutan kaldu akan semakin meningkat. Nilai absorbansi yang terukur menunjukkan densitas bakteri dalam medium larutan kaldu.

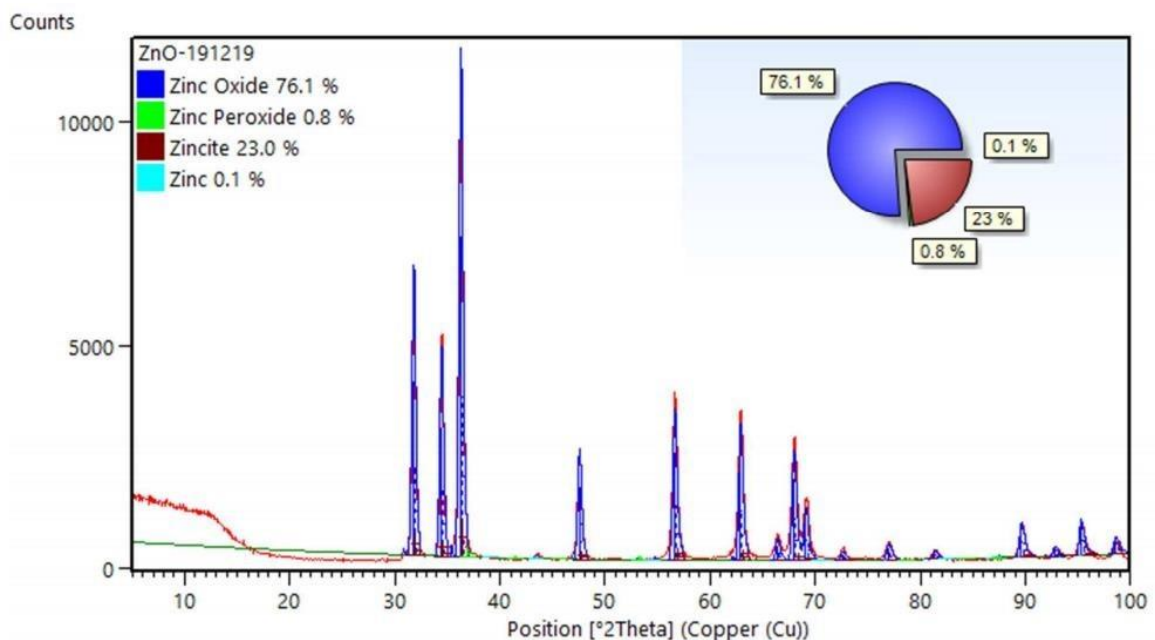


Gambar 3. Larutan Kaldu yang Digunakan Sebagai Media Pertumbuhan Bakteri

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Pengujian X-Ray Diffraction (XRD)

Hasil pengujian XRD ditunjukkan pada Gambar 4. Dari pengujian XRD ini diperoleh komposisi serbuk dan *derived data* berupa ukuran dari serbuk yang digunakan dalam penelitian ini. *Derived data* dari pengujian XRD ini ditunjukkan pada Gambar 5. Hasil pengujian XRD menunjukkan bahwa serbuk yang digunakan dalam penelitian ini benar merupakan senyawa ZnO yang berukuran sebesar 257,0 Å (25,7 nm) dan 250,5 Å (25,05 nm). Ukuran ini termasuk ke dalam ukuran nanopartikel. Seperti yang telah diketahui, nanopartikel merupakan partikel yang berukuran kurang dari 100 nanometer ( $1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$ ) (Callister & Rethwisch, 2009).



Gambar 4. Hasil Pengujian XRD

Micro Strain ...	0.120	Micro Strain [%]	0.091
Micro Strain ...	1E-5	Micro Strain ESD	0
Crystallite Si...	257.0	Crystallite Size [Å]	250.5
Crystallite Si...	0	Crystallite Size ESD	0
Density [g/c...	5.67	Density [g/cm <sup>3</sup> ]	5.67
F000	76	F000	76
Chemical For...	O2.00 Zn2.00	Chemical Formula	O2....
Formula Mass	162.76	Formula Mass	162...
R Bragg	9.55	R Bragg	9.78
Weight Perc...	100	Weight Percentage [%]	100
Recalculated...	0	Recalculated Weight P...	0
As Received...	0	As Received Weight P...	0

(a)

(b)

Gambar 5. Derived Data Pengujian XRD (a) Zinc Oxide dan (b) Zincite

Semakin kecil ukuran nanopartikel ZnO, maka semakin efektif menghambat perkembangan bakteri (Pasaribu & Saragih, 2013). Ukuran partikel yang semakin kecil mengakibatkan luas permukaan efektif dari material antibakteri yang menghambat pertumbuhan bakteri semakin meningkat. Dengan kata lain, dengan ukuran nanopartikel yang semakin kecil, sifat antibakteri dari material antibakteri akan semakin baik dan efektif. Selain itu, ZnO pun merupakan material oksida yang memiliki toksisitas rendah dan *biocompatible*, sehingga aman digunakan sebagai material antibakteri dan dalam aplikasi biomedis (Kumar et al., 2017; Pasaribu & Saragih, 2013).

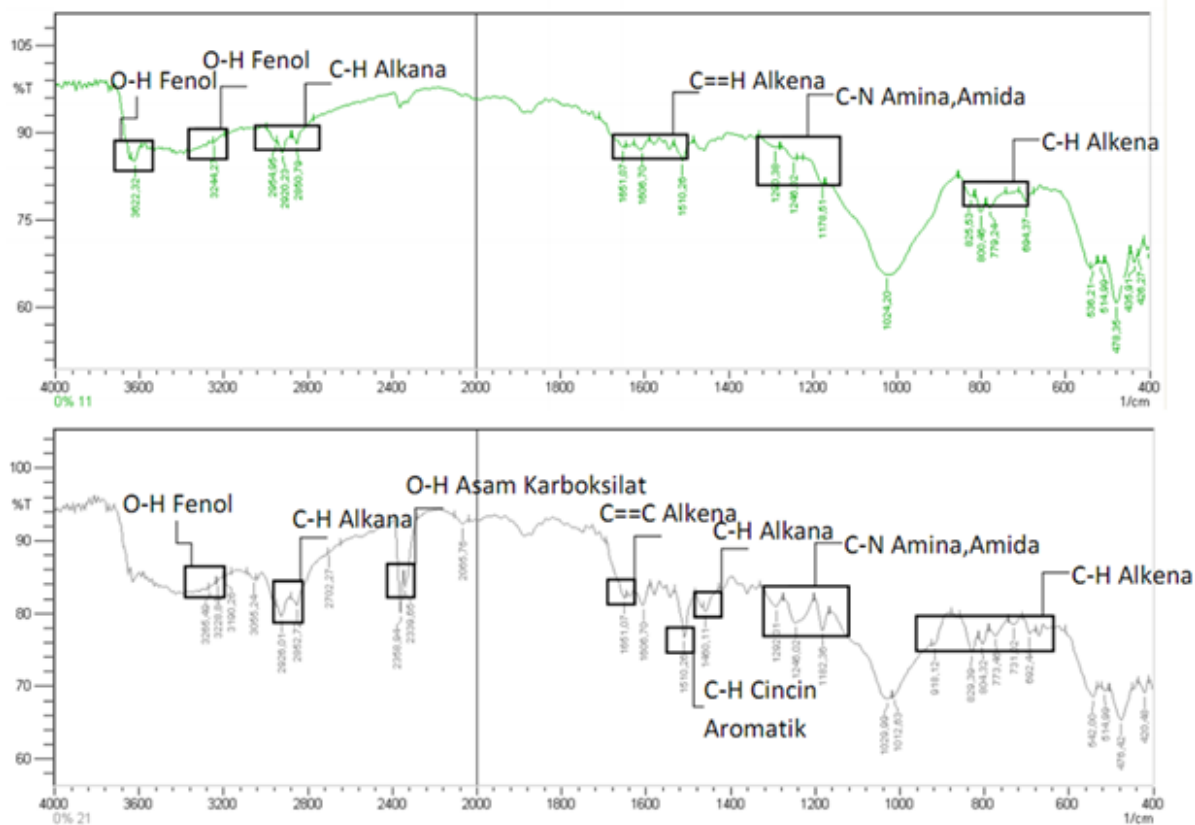
### 3.2. Pengujian Fourier Transform Infra-Red (FTIR)

Pengujian FTIR dilakukan terhadap material PMC epoksi – ZnO yang telah dibuat. Tabel 1 menunjukkan serapan gelombang dari PMC epoksi – ZnO. Hasil pengujian FTIR dari material PMC epoksi – ZnO 0%; 0,6% dan 0,9% berturut-turut ditunjukkan pada Gambar 6, Gambar 7 dan Gambar 8.

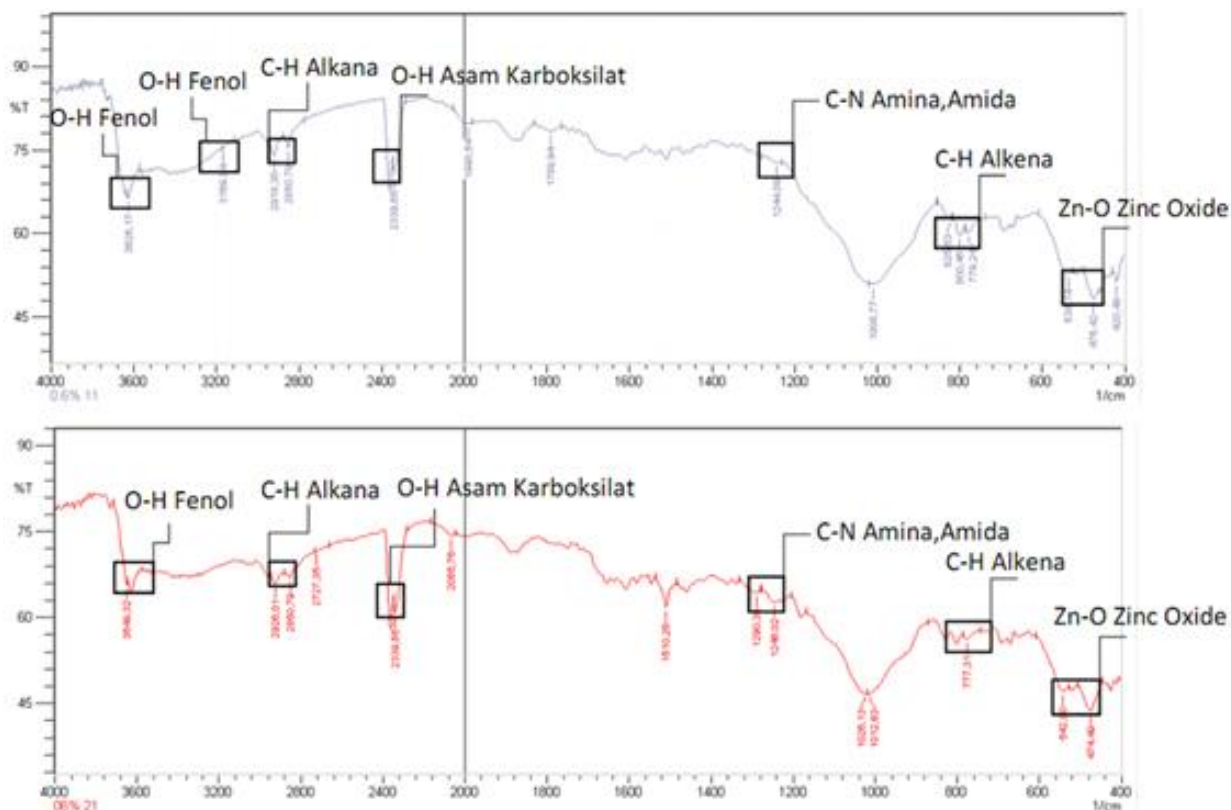
Hasil pengujian FTIR menunjukkan bahwa gugus fungsi Zn-O (*zinc oxide*) terdapat pada Gambar 7 dan Gambar 8. Hal ini sesuai dengan komposisi dari PMC yang dibuat. Gambar 6 merupakan serapan gelombang dari resin epoksi (PMC epoksi – ZnO 0%), tanpa adanya filler nanopartikel ZnO. Sedangkan Gambar 7 dan 8 merupakan serapan gelombang dari PMC epoksi – ZnO 0,6% dan 0,9%.

Tabel 1. Serapan Gelombang PMC Epoksi-ZnO

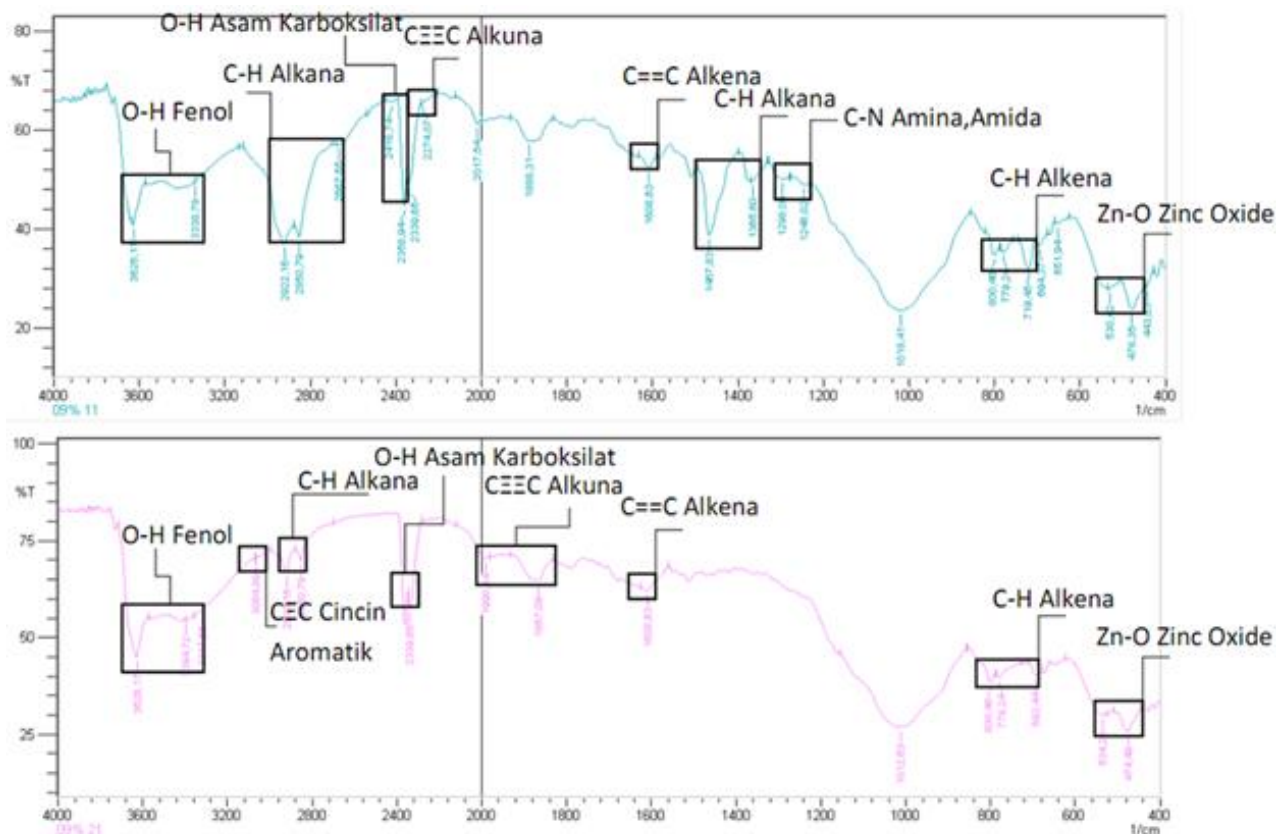
Serapan Gelombang (cm <sup>-1</sup> )	Gugus Fungsi
450 – 546	Zn – O
694.37 – 825.53	Alkena C – H
1178,51 – 1290.38	Amina C – N
2850.79 – 2954.95	Alkana C – H
3244 – 3622	Fenol O - H



Gambar 6. Hasil Pengujian FTIR dari PMC Epoksi – ZnO 0% 1R:1H (atas) dan 2R:1H (bawah)



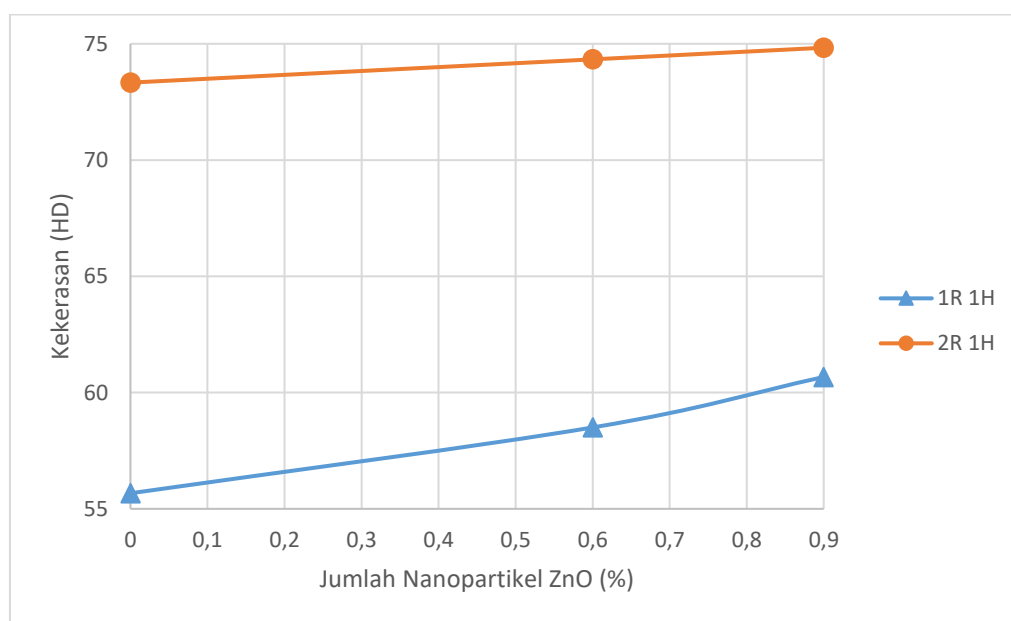
Gambar 7. Hasil Pengujian FTIR dari PMC Epoksi – ZnO 0,6% 1R:1H (atas) dan 2R:1H (bawah)



Gambar 8. Hasil Pengujian FTIR dari PMC Epoksi – ZnO 0,9% 1R:1H (atas) dan 2R:1H (bawah)

### 3.3. Pengujian Kekerasan

Gambar 9 menunjukkan nilai kekerasan dari PMC epoksi-ZnO. Berdasarkan Gambar 9, terlihat bahwa nilai kekerasan material PMC epoksi – ZnO meningkat seiring dengan meningkatnya komposisi resin dan persentase nanopartikel ZnO. Hal ini dikarenakan dengan penambahan komposisi resin, maka densitas dari komposit yang terbentuk semakin besar. Nilai kekerasan tertinggi diperoleh dari material PMC epoksi – ZnO 0,9% 2R:1H senilai 74,82. Sedangkan nilai kekerasan terendah diperoleh dari material PMC epoksi – ZnO 0% 1R:1H.



Gambar 9. Hasil Pengujian Kekerasan

Sebagai bahan perbandingan, dilakukan pengujian kekerasan terhadap gagang sikat gigi bermerk yang dijual di pasaran. Nilai kekerasan dari gagang sikat gigi bermerk ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai Kekerasan Sikat Gigi di Pasaran

Sikat Gigi	Nilai Kekerasan (HD)
C	65,83
P	44,00

Seperti terlihat pada Tabel 2, nilai kekerasan PMC epoksi – ZnO lebih besar dibandingkan dengan nilai kekerasan dari sikat gigi yang berada di pasaran. Dapat dikatakan bahwa, nilai kekerasan dari PMC epoksi – ZnO yang dihasilkan sudah cukup baik.

### 3.4. Pengujian Sifat Antibakteri

Dalam penelitian ini, sifat antibakteri diuji menggunakan spektrofotometer dengan metode *optical density*. Nilai absorbansi dari medium larutan kaldu (Gambar 3) merupakan nilai absorbansi awal yang menjadi standar pengukuran. Nilai absorbansi awal menunjukkan jumlah bakteri yang ada di dalam medium larutan kaldu sebelum dimasukkan PMC yang berperan sebagai material antibakteri.

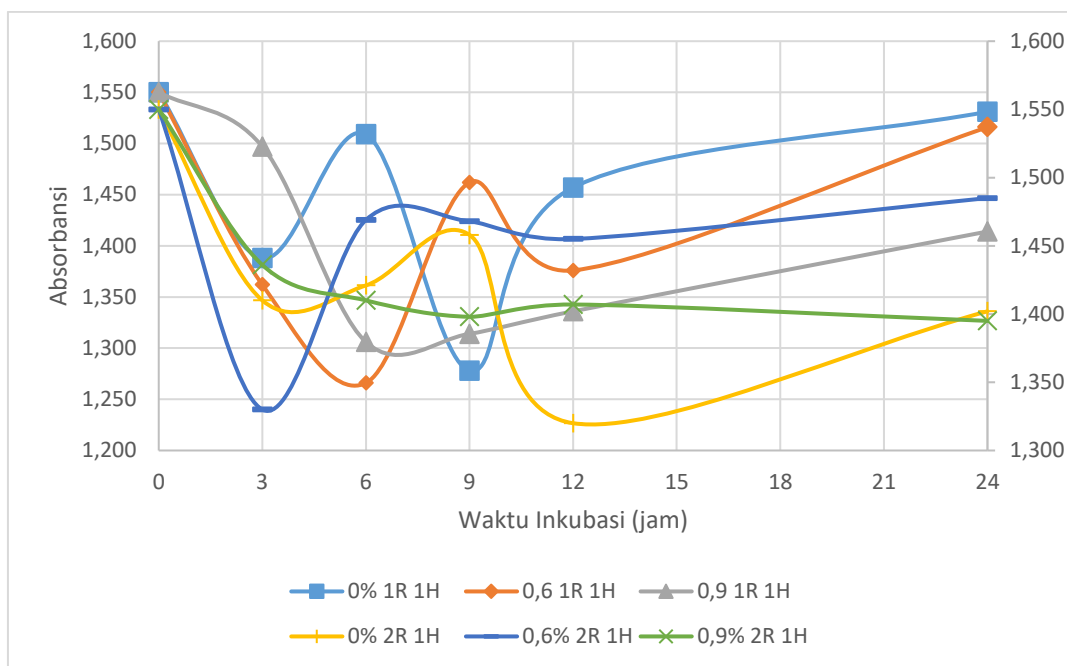


Gambar 10. Proses Pengujian Sifat Antibakteri PMC Epoksi – ZnO dalam Medium Larutan Kaldu

Pengujian antibakteri dari material PMC epoksi – ZnO dilakukan dengan mencelupkan material PMC epoksi – ZnO ke dalam medium larutan kaldu, seperti ditunjukkan pada Gambar 10. Proses pengujian ini dilakukan dengan variasi waktu 0 jam, 3 jam, 6 jam, 9 jam, 12 jam dan 24 jam. Dengan dimasukkannya PMC epoksi – ZnO yang berperan sebagai material antibakteri, maka jumlah bakteri yang ada dalam medium larutan kaldu akan berkurang. Hal tersebut dapat terlihat dari nilai absorbansi yang terukur dari medium larutan kaldu setelah dicelupkan material PMC epoksi – ZnO.

Pada Gambar 11, terlihat adanya penurunann nilai absorbansi dari material PMC – epoksi dengan komposisi ZnO 0% 1R:1H dan ZnO 0% 2R:1H. Hal ini menunjukkan bahwa sifat antibakteri dari PMC epoksi - ZnO 0% 2R:1H lebih baik dibandingkan dengan PMC epoksi - ZnO 1R:1H. Peningkatan sifat antibakteri ini disebabkan oleh adanya gugus fungsi O – H dari asam karboksilat yang muncul pada material PMC epoksi - ZnO 0% 2R:1H (Gambar 6). Gugus fungsi O – H inilah yang dimanfaatkan dalam proses deaktivasi dan penguraian mikroorganisme.





Gambar 11. Nilai Absorbansi PMC

Hasil pengukuran nilai absorbansi dari medium larutan kaldu ditunjukkan pada Gambar 11. Pengujian sifat antibakteri dari medium larutan kaldu ini tidak terlihat signifikan perubahannya. Hal ini mungkin terjadi karena waktu pengujian yang tidak terlalu lama. Namun demikian, dari hasil pengujian menggunakan spektrofotometer dengan metode *optical density* dapat dikatakan bahwa sifat antibakteri dari material PMC epoksi – ZnO meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah nanopartikel ZnO.

Namun bukan hanya jumlah nanopartikel yang mempengaruhi sifat antibakteri dari material antibakteri ini. Faktor lainnya yang mempengaruhi sifat antibakteri adalah distribusi nanopartikel ZnO dalam matriks epoksi dan interaksi antarmuka antara ZnO dan matriks epoksi.

### Kesimpulan

Berdasarkan data hasil pengujian didapat bahwa dengan penambahan serbuk nanopartikel ZnO sebesar 0%; 0,6% dan 0,9% pada matriks epoksi, maka densitas komposit meningkat, sehingga nilai kekerasan pun meningkat. Sifat antibakteri dari PMC epoksi yang didoping dengan ZnO menunjukkan bahwa penambahan nanopartikel ZnO meningkatkan sifat antibakteri.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Jenderal Achmad Yani yang telah mendanai penelitian ini. Tidak lupa pula, penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam proses penelitian dan pembuatan artikel ilmiah ini.

### Daftar Notasi

- R = resin
- H = *hardener*
- $E_B$  = modulus elastisitas *bending*
- L = panjang *span*
- m = *slope of tangent*
- b = lebar spesimen
- d = tebal spesimen

### Daftar Pustaka

- ASTM INTERNATIONAL. (2002). Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. D790. In *Annual Book of ASTM Standards*. <https://doi.org/10.1520/D0790-10>.
- Azam, A., Ahmed, A. S., Oves, M., Khan, M. S., Habib, S. S., & Memic, A. (2012). Antimicrobial activity of metal oxide nanoparticles against Gram-positive and Gram-negative bacteria: A comparative study. *International*

- Journal of Nanomedicine*, 7, 6003–6009. <https://doi.org/10.2147/IJN.S35347>
- Bawardi, J. T. (2018). *Pembuatan Biofilm Antibakteri Berbahan Nanopartikel ZnO*.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2009). Materials science and engineering. In *John Wiley & Sons, Inc.* (8th ed.). John Wiley and Sons Inc.
- Chavali, M. S., & Nikolova, M. P. (2019). Metal oxide nanoparticles and their applications in nanotechnology. *SN Applied Sciences*, 1(6), 607. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0592-3>
- Droval, G., Aranberri, I., Bilbao, A., German, L., Verelst, M., & Dexpert-Ghys, J. (2008). Antimicrobial activity of nanocomposites: Poly(amide) 6 and low density poly(ethylene) filled with zinc oxide. *E-Polymers*, 128. <https://doi.org/10.1515/epoly.2008.8.1.1467>
- Gibson, G. (2017). Epoxy Resins. In *Brydson's Plastics Materials: Eighth Edition* (pp. 773–797). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00027-X>
- Hrenovic, J., Milenkovic, J., Daneu, N., Kepcija, R. M., & Rajic, N. (2012). Antimicrobial activity of metal oxide nanoparticles supported onto natural clinoptilolite. *Chemosphere*, 88, 1103–1107. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.05.023>
- HT, I. (2020). *Measuring Biomass in Shake Flasks: Offline OD vs. Online Backscatter Light / EN Blog | INFORS HT*. <https://www.infors-ht.com/fr/blog/measuring-biomass-in-shake-flasks-offline-od-vs-online-backscatter-light/>
- Jones, N., Ray, B., Ranjit, K. T., & Manna, A. C. (2007). *Antibacterial activity of ZnO nanoparticle suspensions on a broad spectrum of microorganisms*. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2007.01012.x>
- Kumar, R., Umar, A., Kumar, G., & Nalwa, H. S. (2017). Antimicrobial properties of ZnO nanomaterials: A review. In *Ceramics International* (Vol. 43, Issue 5, pp. 3940–3961). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.12.062>
- Padmavathy, N., & Vijayaraghavan, R. (2008). Enhanced bioactivity of ZnO nanoparticles - An antimicrobial study. *Science and Technology of Advanced Materials*, 9(3). <https://doi.org/10.1088/1468-6996/9/3/035004>
- Pasaribu, K. F., & Saragih, H. (2013). Aktivitas Antimikrobia Nanopartikel Zinc Oxide ( ZnO ) pada Strain Staphylococcus Aureus. In *Prosiding Seminar Kontribusi Fisika 2013* (Issue Desember).
- Prasanna, S. R. V. S., Balaji, K., Pandey, S., & Rana, S. (2019). Metal Oxide Based Nanomaterials and Their Polymer Nanocomposites. In *Nanomaterials and Polymer Nanocomposites* (pp. 123–144). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814615-6.00004-7>
- Wu, C., Yan, Y., Wang, Y., Sun, P., & Qi, R. (2020). Antibacterial epoxy composites with addition of natural *Artemisia annua* waste. *E-Polymers*, 20(1), 262–271. <https://doi.org/10.1515/epoly-2020-0029>