

Pengaruh Kecepatan Pengadukan serta Penambahan Poli Vinil Alkohol (PVA) dan Sodium Dodesil Sulfat (SDS) pada Enkapsulasi Minyak Biji Rami dalam Urea-Formaldehid Untuk Aplikasi *Self-Healing Coating*

Reviana Indah Dwi Suyatmo^{1*}, Noviannisa Cahya Fitriyani¹, Mitha Anifanisa Fadila¹, Ella Melyna¹ dan Lukman nulhakim²

¹Program Studi Teknik Kimia Polimer, Politeknik STMI Jakarta, Indonesia

²Program Studi Teknik Kimia, Universitas Jayabaya, Indonesia

*) revianastmi@gmail.com

Abstract

The self-healing coating is a protective system for metal that prevents or slows down the corrosion process by having an independent damage repair system. This research studied the effect of stirring speed as well as the addition of Poly Vinyl Alcohol (PVA) and Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) on the encapsulation of linseed oil in urea-formaldehyde for self-healing coating applications. Stirring speeds used were 900 rpm, 1000 rpm, and 1200 rpm. The surfactant/emulsifier used were Polyvinyl Alcohol (PVA) and Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) with mass percentage ratio of PVA/SDS 5:0, 5:1, 4:1, 0:5. The results of Fourier Transform Infrared (FTIR) test prove that molar there is linseed oil which was successfully encapsulated in urea-formaldehyde. The results of digital microscope test showed that with a stirring speed of 1200 rpm, the smallest average diameter of microcapsules was obtained, which was 44,179 μm . The 5:1 PVA/SDS variation produces microcapsules with the smallest diameter and round shape compared to other variations, which was 67.1822 μm . The results of the performance test of self-healing coating using microcapsules with the smallest diameter on the surface of a steel plate prove that linseed oil can repair damage by narrowing the scratch area.

Abstrak

. Self-healing coating merupakan sistem pelindung pada logam dalam mencegah atau memperlambat proses korosi dengan mempunyai sistem perbaikan kerusakan secara mandiri. Penelitian ini mempelajari Pengaruh Kecepatan Pengadukan serta Penambahan Penambahan Poli Vinil Alkohol (PVA) dan Sodium Dodesil Sulfat (SDS) pada Enkapsulasi Minyak Biji Rami dalam Urea-Formaldehid Untuk Aplikasi *Self-Healing Coating*. Variasi kecepatan pengadukan yang dipakai yaitu 900 rpm, 1000 rpm, dan 1200 rpm. Surfaktan/pengemulsi yang digunakan yaitu Polivinil Alkohol (PVA) dan Sodium Dodesil Sulfat (SDS) dengan rasio persentase massa PVA/SDS yakni 5:0, 5:1, 4:1, 0:5. Hasil pengujian gugus fungsi mikrokapsul dengan diameter ideal menggunakan fourier transform infrared (FTIR) membuktikan bahwa adanya minyak biji rami yang berhasil terenkapsulasi dalam urea-formaldehid. Hasil pengujian ukuran diameter mikrokapsul menggunakan mikroskop digital menunjukkan dengan kecepatan pengadukan 1200 rpm didapatkan diameter rata-rata mikrokapsul terkecil yaitu sebesar 44,179 μm . Variasi PVA/SDS 5:1 menghasilkan ukuran mikokapsul dengan diameter terkecil dan berbentuk bulat dibandingkan dengan variasi lainnya yaitu sebesar 67,1822 μm . Hasil pengujian kinerja self-healing coating menggunakan mikrokapsul dengan diameter terkecil pada permukaan plat steel membuktikan bahwa minyak biji rami mampu memperbaiki kerusakan dengan mempersempit area goresan.

Keywords : *encapsulation, linseed oil, Poly Vinyl Alcohol, self-healing coating, SDS*

PENDAHULUAN / INTRODUCTION

Korosi merupakan salah satu bentuk kerusakan struktur logam yang menghasilkan limbah logam dalam jumlah besar dan berdampak pada pertimbangan ekonomi. Diperkirakan 2-5% PDB (produk domestik bruto) seluruh negara hilang setiap tahunnya. Hal ini mendorong para peneliti untuk merancang dan mengembangkan suatu sistem untuk mengatasi korosi. Para peneliti telah mulai mengembangkan sistem pelapisan/*coating* organik untuk menutupi permukaan logam yang terkena korosi. Namun, penggunaan pelapis organik memiliki banyak kelemahan. Lapisan organik rentan terhadap kerusakan akibat lingkungan, sehingga mengurangi efektivitasnya. Oleh karena itu, perkembangan ilmu polimer telah menghasilkan pelapis dengan sifat *self-healing*, yang dapat meningkatkan daya tahan dan masa pakai, serta efisiensi pemeliharaan dan perbaikan permukaan [1]. *Self-healing coating* dengan bentuk mikrokapsul dapat memperbaiki retakan secara mandiri tanpa campur tangan [2].

Bahan penyusun mikrokapsul terdiri dari bahan cangkang dan bahan inti. Bahan inti atau *healing agent* membentuk lapisan baru dari lapisan matriks yang rusak, sedangkan bahan cangkang merupakan lapisan luar pelindung bahan inti sebelum kerusakan terjadi pada permukaan [3]. Mikrokapsul dengan bahan cangkang poliurea formaldehida (PUF) memiliki kekuatan terhadap air, sedikit rapuh dan dapat melepaskan bahan inti jika pecah. Tetapi juga memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan bahan inti [4]. Bahan inti dalam kapsul bisa berupa padatan, cairan, ataupun gas, sesuai aplikasi yang diperlukan [5]. Bahan inti yang umumnya digunakan untuk aplikasi *self-healing coating* adalah *drying oil*. *Drying oil* memiliki asam lemak tak jenuh yang tinggi, khususnya asam linolenat. Minyak biji rami merupakan salah satu *drying oil* yang memiliki asam linolenat yang tinggi yaitu sebesar 45-55% dibandingkan dengan minyak nabati lainnya [6]. Adanya asam linolenat berpengaruh pada proses pembentukan film saat minyak terpapar oleh oksigen. Semakin tinggi kadar ikatan rangkap tak jenuh, asam linolenat, dan asam oleat, maka pengerasan film semakin cepat terjadi [1].

Faktor penting dalam menunjang fungsi dari mikrokapsul *self-healing coating* adalah diameter mikrokapsul. Diameter yang baik untuk mikrokapsul *self-healing coating* yaitu berukuran 60–150 μm [7]. Salah satu faktor penentu diameter mikrokapsul adalah peran surfaktan atau pengemulsi [5]. Surfaktan yang umum digunakan dalam *self-healing coating* adalah *Sodium Dodecyl Sulfate* (SDS), *Sodium Dodecylbenzene Sulfonate* (SDBS), *Octylphenol Ethoxylates* (OP) gum arab, asam alginat, selulosa, gelatin, polivinil alkohol (PVA), dan *Ethylene Maleic Anhydride* (EMA) [8]. Penelitian tentang pembuatan *self-healing coating* dengan bahan inti minyak biji kenari dalam urea-formaldehid menyatakan bahwa penggunaan PVA 5% sebagai surfaktan menghasilkan diameter mikrokapsul yang paling kecil dibandingkan variasi lainnya yaitu 90,1426 μm [9]. Penelitian lainnya tentang enkapsulasi minyak biji rami dalam cangkang urea-formaldehid menggunakan persentase surfaktan 5% PVA dan 1% SDS dengan kecepatan pengadukan 900 rpm menghasilkan ukuran diameter rata-rata mikrokapsul sebesar 65,2 \pm 4,4 μm dengan permukaan mikrokapsul yang halus. SDS berperan sangat baik sebagai stabilizer karena memiliki tegangan permukaan yang rendah sehingga adanya penambahan SDS dapat memperkecil diameter rata-rata dari mikrokapsul [10].

Selain surfaktan, kecepatan pengadukan pada proses enkapsulasi juga berpengaruh terhadap diameter mikrokapsul yang terbentuk. Peningkatan kecepatan pengadukan dapat menurunkan ukuran diameter mikrokapsul. Mikrokapsul hasil proses enkapsulasi polimerisasi in-situ dengan kecepatan pengadukan 900 rpm menghasilkan ukuran terkecil yaitu 62,56 μm dibandingkan dengan kecepatan pengadukan lainnya [11]. Semakin tinggi kecepatan pengadukan maka diameter mikrokapsul yang dihasilkan semakin kecil A2[2].

METODE PENELITIAN / RESEARCH METHODOLOGY

Alat utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah *overhead stirrer*, labu leher 3, *hotplate*, batang pengaduk 4 *blades*, *centrifuge*, *plate steel*, *film applicator*, *Fourier Transform Infra Red*, *Industrial microscope digital camera*, dan thermometer digital. Bahan-bahan yang digunakan antara lain Polivinil Alkohol (PVA) teknis, Sodium Dodesil Sulfat (SDS) Pro Analisis Merck, Resorsinol Pro Analisis Merck, Amonium klorida Pro Analisis Merck, Urea Pro Analisis Merck, Formaldehid Pro Analisis CDH, Minyak Biji Rami produksi Swisloyd (Asam Lemak Jenuh 12,91%, Asam Oleat 24,90%, Asam Linolenat 46,51%, dan Asam Linoleat 15,12%), Natrium klorida Pro Analisis Merck, Aseton teknis, Resin Epoksi dan Hardener, dan Aquades.

Aquades 250 ml dipanaskan hingga suhu 55°C dan kecepatan pengadukan yang telah diatur sesuai variasi (900, 1000, dan 1200 rpm). Kemudian surfaktan PVA dan SDS sesuai dengan variasi rasio persentase massa (5:0, 5:1, 4:1, 0:5) dilarutkan dalam 258 ml aquades dan diaduk selama 10 menit. Selanjutnya urea sebanyak 5 gram, resorsinol 0,5 gram dan amonium klorida 0,5 gram dimasukkan ke dalam larutan dan diaduk selama 15 menit. Minyak biji rami 20 ml ditambahkan ke dalam labu leher tiga dan diaduk selama 30 menit. Kemudian terakhir, formaldehid ditambahkan sebanyak 14 ml dan diaduk selama 150 menit. Proses pengadukan dilakukan pada suhu 55°C.

Hasil enkapsulasi kemudian dilakukan pemisahan dengan alat sentrifugasi dengan kecepatan 4000 rpm selama 20 menit sehingga dihasilkan 3 lapisan yaitu produk atas, pelarut, dan produk bawah. Produk atas dan produk bawah dipisahkan lalu dibilas menggunakan aquades untuk menghilangkan surfaktan hingga mencapai pH netral dan selanjutnya dikeringkan pada suhu ruang. Produk atas merupakan mikrokapsul sedangkan produk bawah merupakan sisa urea-formaldehid yang tidak terenkapsulasi. Produk atas dan produk bawah kemudian dilakukan pengujian.

FTIR digunakan untuk melihat keberhasilan proses enkapsulasi minyak biji rami dalam cangkang urea-formaldehid berdasarkan identifikasi gugus fungsi. Sebelum dilakukan pengujian FTIR, minyak biji rami dan cangkang urea-formaldehid harus dipisahkan. Pemisahan ini dilakukan sesuai penelitian sebelumnya [12] dengan cara menggerus mikrokapsul sebanyak 1 gram hingga pecah dengan menggunakan alu dan mortar, kemudian dilarutkan dengan 10 ml aseton. Cangkang kapsul yang tidak larut dipisahkan dan dikeringkan, sedangkan minyak yang terlarut dalam aseton dipanaskan untuk menguapkan aseton sehingga menyisakan minyak biji rami saja.

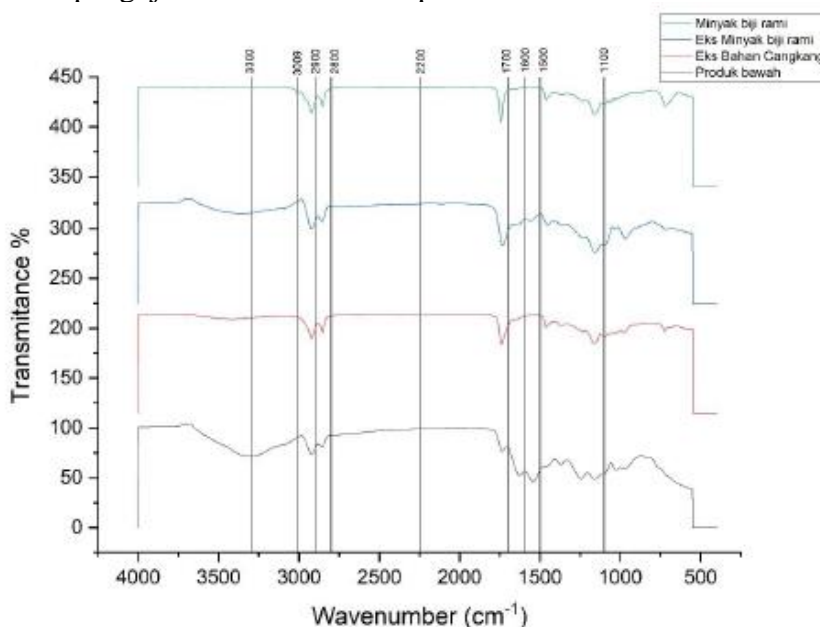
Mikrokapsul yang dihasilkan dilakukan analisis ukuran diameter rata-mikrokapsul dengan menggunakan mikroskop digital. Pengujian kinerja self-healing dilakukan menggunakan plate steel. Mikrokapsul sebanyak 3% dicampur dengan resin epoksi dan hardener, lalu diaduk secara perlahan. Kemudian campuran tersebut diaplikasikan ke permukaan plat steel berukuran 60×60×2 mm dengan menggunakan film applicator. Spesimen disimpan pada suhu ruang selama 6 jam kemudian dilakukan post cured pada suhu 80°C selama 1 jam. Goresan dibuat dengan kedalaman mulai dari permukaan coating sampai dengan permukaan logam dan didiamkan selama 6 hari pada suhu ruang. Sampel kemudian dianalisis kinerja self-healing dengan menggunakan mikroskop dengan membandingkan lebar area goresan pada sebelum dan setelah penggoresan.

Pengujian korosi juga dilakukan pada plat steel dengan metode yang hampir sama dengan pengujian kinerja self-healing. Namun, setelah plat steel digores, plat steel disimpan selama 3 hari kemudian direndam dalam larutan 10% NaCl selama 48 jam. Sampel kemudian dicuci dengan aquades untuk dianalisis menggunakan mikroskop digital.

HASIL DAN PEMBAHASAN / RESULTS AND DISCUSSION

Pengujian Gugus Fungsi

Pengujian gugus fungsi pada hasil enkapsulasi minyak biji rami dalam urea-formaldehid bertujuan untuk mengetahui gugus fungsi bahan cangkang dan bahan inti mikrokapsul. Pengujian gugus fungsi dilakukan pada sampel produk bawah atau sisa urea-formaldehid, minyak biji rami, serta hasil dari pemecahan dan ekstraksi pemisahan yaitu bahan inti dan bahan cangkang. Gambar 1 menunjukkan hasil pengujian FTIR untuk sampel.



Gambar 1. Hasil Pengujian Gugus Fungsi

Tabel 1 menunjukkan hasil pengujian gugus fungsi pada bahan inti dan bahan cangkang hasil ekstraksi pemisahan, produk bawah, serta minyak biji rami. Gugus fungsi minyak biji rami memiliki karakteristik seperti pada Tabel 2 [13] sedangkan urea-formaldehid memiliki gugus fungsi C-H; N-H; C-N; O-H; C=O seperti pada Tabel 3 [14][15].

Tabel 1. Hasil Pengujian Gugus Fungsi

Gugus Fungsi	Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)			
	Produk Bawah	Minyak Biji Rami	Hasil ekstraksi Cangkang	Hasil ekstraksi bahan inti
C=O	1735,23	1742,92	1731,44	1700
O-H	3293,02	-	3363,02	3432,21
C-H stretch asimetris CH ₂	2922,44	2922,24	2921,98	2922,19
C-H stretch asimetris CH ₂	2856,06	2852,27	2856,27	2853,53
N-H	1626,11	-	1642,56	-
C-N	1371,72	-	1366,28	-
C-O	-	1159,76	-	1032,35
=C-H	-	3009,20	-	-

Tabel 2. Gugus Fungsi Minyak Biji Rami Referensi [13]

Gugus Fungsi	Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)
C=O	1742,92
C=C	1655
C-H stretch asimetris CH ₂	2922,24
C-H stretch asimetris CH ₂	2852,27
C-O	1159,76 dan 1236,54
=C-H	3009,20

Tabel 3. Gugus Fungsi Cangkang Urea-Formaldehid Referensi

Gugus Fungsi	Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)	
	Referensi 1[14]	Referensi 2[15]
C=O	1649	±1700
O-H	3365	3344
C-H stretch asimetris CH ₂	2961	2900
C-H stretch asimetris CH ₂	±2800	2800
N-H	3050	1627
C-N	1563	1549

Dengan melihat Tabel 1 dan Tabel 3, terlihat adanya kesesuaian hasil gugus fungsi dan range bilangan gelombang dengan referensi. Hasil pengujian gugus fungsi pada produk bawah sesuai dengan referensi bahwa hasil gugus fungsi pada produk bawah memiliki gugus memiliki gugus fungsi C–H pada bilangan gelombang 2856.06 dan 2922.44 cm⁻¹, gugus fungsi N–H pada bilangan gelombang 1626.11cm⁻¹, gugus C–N pada bilangan gelombang 1371.72 cm⁻¹, O–H terletak pada bilangan gelombang 3293.02 cm⁻¹, dan C=O yang terletak pada bilangan gelombang 1626.11 dan 1735.23 cm⁻¹. Hal ini membuktikan bahwa hasil dari produk bawah merupakan sisa bahan cangkang yang mengandung urea-formaldehid.

Berdasarkan Tabel 1 dan Tabel 2, terbukti adanya kesesuaian gugus fungsi dan range bilangan gelombang antara hasil ekstraksi bahan inti mikrokapsul, minyak biji rami, dan referensi. Gugus fungsi yang dihasilkan pada sampel yang sudah melalui proses ekstraksi bahan inti juga memiliki gugus fungsi yang sesuai dengan gugus fungsi dan range bilangan gelombang pada sampel minyak biji rami yaitu gugus fungsi C–H dan gugus fungsi C–O, serta puncak serapan yang kuat sekitar bilangan gelombang 1700 cm⁻¹ yang menandakan gugus fungsi C=O. Sehingga dapat disimpulkan bahwa bahan inti mengandung minyak biji rami dan berhasil terenkapsulasi dalam cangkang urea-formaldehid.

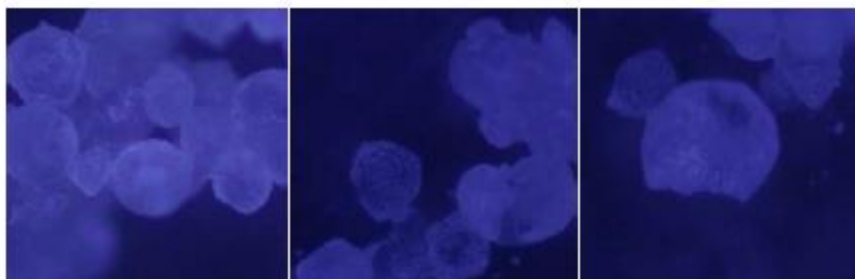
Pengujian Diameter Mikrokapsul

Tabel 4. Hasil Pengujian Diameter Mikrokapsul

Variable Penelitian		Diameter Rata-rata Mikrokapsul (μm)
Variabel Bebas	Variabel Tetap	
PVA:SDS 5:0	Pengadukan 900 rpm	82,4266
PVA:SDS 5:1		67,1822
PVA:SDS 4:1		75,5920
PVA:SDS 0:5		168,9620
pengadukan 900 rpm	PVA:SDS 5:1	67,1822
pengadukan 1000 rpm		58,9605
pengadukan 1200 rpm		44,1790

Berdasarkan Tabel 4, kecepatan pengadukan 1200 rpm menghasilkan mikrokapsul dengan diameter rata-rata sebesar 44,1790 μm . Hasil penelitian sebelumnya yang menggunakan kecepatan pengadukan tertinggi yaitu 1200 rpm pada proses enkapsulasi menghasilkan diameter ukuran mikrokapsul sebesar $41,5 \pm 2,1 \mu\text{m}$ [10]. Hasil penelitian ini menghasilkan mikrokapsul dengan diameter rata-rata yang lebih kecil dari penelitian sebelumnya [11] dengan kecepatan pengadukan tertinggi yaitu 900 rpm menghasilkan diameter 62,56 μm . Hasil ini juga sesuai dengan penelitian yang menyatakan bahwa semakin tinggi kecepatan pengadukan yang dipakai, maka akan semakin kecil diameter mikrokapsul yang dihasilkan [16].

Diameter terkecil dihasilkan dengan surfaktan PVA:SDS 5:1. Pada SDS 5%, ukuran diameter sulit diidentifikasi dikarenakan bentuk yang tidak konsisten seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2. Pada Gambar 2 dapat dilihat bahwa bentuk mikrokapsul dengan surfaktan 5% SDS memiliki bentuk yang tidak stabil dan cenderung lebih besar dan berkelompok. Penelitian sebelumnya [17] menyatakan bahwa SDS tidak diperuntukkan untuk digunakan secara sendiri (harus digabungkan dengan surfaktan lain) dan akan menghasilkan bentuk yang tidak konsisten. SDS memiliki berat molekul yang rendah sehingga memiliki cakupan dan tegangan permukaan yang relatif rendah dibandingkan dengan surfaktan dengan berat molekul yang lebih tinggi [18].

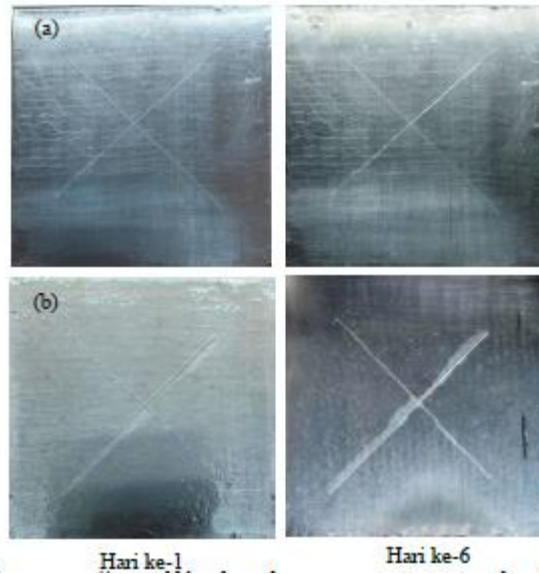


Gambar 2. Citra Mikroskop Mikrokapsul dengan PVA:SDS 0:5

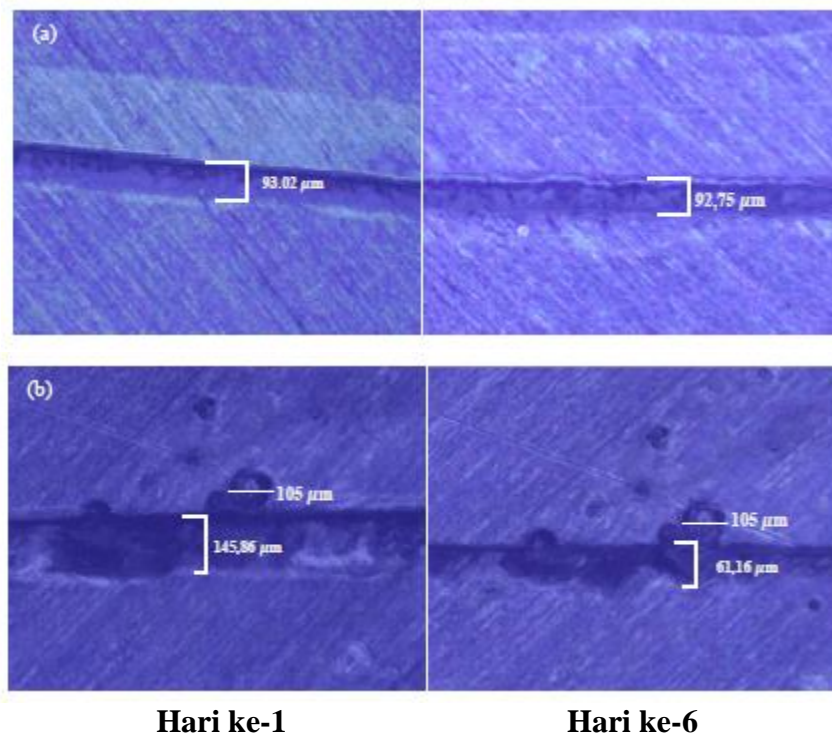
Pengujian Kinerja Self-Healing

Pengujian kinerja *self-healing* hasil enkapsulasi minyak biji rami dalam urea-formaldehid pada *plat steel* di penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja *self-healing* terhadap aplikasi *coating* seperti ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4. Pada Gambar 3, terlihat setelah hari ke-6 seperti ada lapisan cairan lebih lebar yang menutupi goresan. Pada Gambar 4, citra mikroskop

menunjukkan lebar goresan rata-rata berkurang dari hari ke-1 hingga hari ke-6 sedangkan pada sampel kontrol, lebar goresan relatif sama.



Gambar 3. Foto Hasil Pengujian Kinerja Self-Healing Coating (a) sampel kontrol tanpa mikrokapsul (b) sampel dengan mikrokapsul



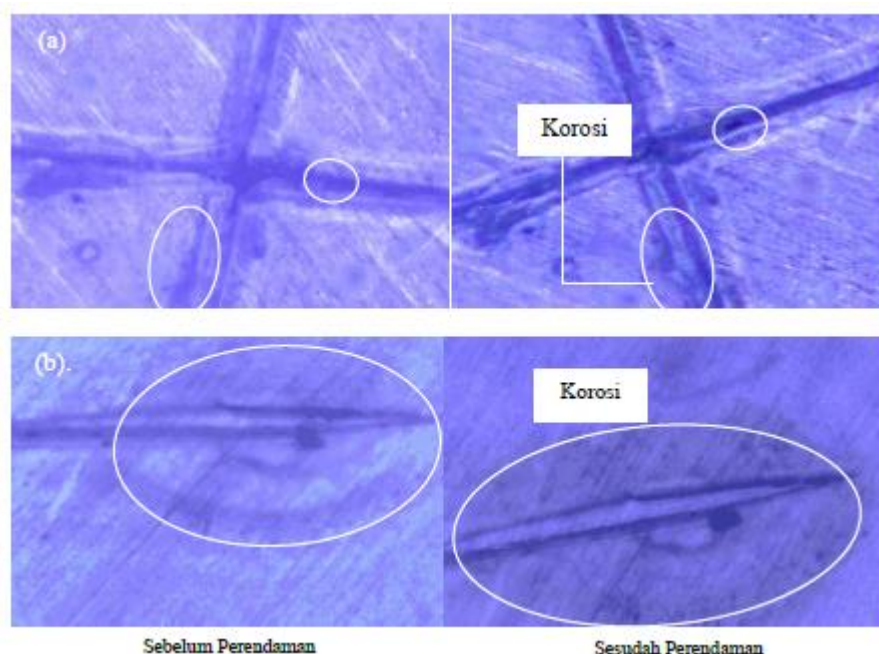
Gambar 4. Citra Mikroskop Pengujian Kinerja Self-Healing Coating (a) sampel kontrol tanpa mikrokapsul (b) sampel dengan mikrokapsul

Perbaikan kerusakan pada sampel self-healing coating yang mengandung mikrokapsul dipicu oleh adanya goresan pada dinding mikrokapsul sehingga mengakibatkan terlepasnya bahan inti (healing agent) dan menyebar ke seluruh area yang tergores. Bahan inti minyak biji rami berkontak langsung dengan oksigen dan mengalami reaksi autooksidasi. Reaksi autooksidasi terjadi pada ikatan rangkap asam lemak tak jenuh sehingga membentuk radikal. Radikal yang terbentuk bergabung dengan ikatan rangkap lainnya sehingga membentuk jaringan (ikatan silang) yang

disebut polimerisasi. Ikatan silang ini membentuk padatan di dalam minyak. Lapisan padat inilah yang melindungi permukaan logam yang tergores dari pengaruh luar [19].

Pengujian Korosi

Pengujian korosi pada *plat steel* bertujuan untuk mengetahui keefektifan dari penambahan mikrokapsul hasil enkapsulasi minyak biji rami dalam urea-formaldehid terhadap ketahanan terhadap karat. Minyak biji rami dalam mikrokapsul berperan penting dalam mencegah atau memperlambat munculnya korosi pada area kerusakan [20]. Hasil pengujian korosi ditunjukkan oleh Gambar 5. Dapat dilihat bahwa pada plat steel dengan mikrokapsul hanya sedikit terlihat perubahan korosinya baik sebelum dan sesudah perendaman NaCl. Hal ini ditandai dengan sedikit warna kekuningan pada area pinggir goresan. Hasil uji korosi dengan mikroskop pada sampel coating dengan kandungan mikrokapsul hanya membentuk suatu area kecil korosi. Namun, area korosi yang dihasilkan pada sampel coating dengan kandungan mikrokapsul tidak seluas area korosi pada sampel coating kontrol. Oleh karena itu, adanya mikrokapsul hasil enkapsulasi minyak biji rami dalam urea-formaldehid untuk aplikasi *self-healing coating* dibuktikan mampu untuk memperlambat proses korosi serta meningkatkan daya pakai logam.



Gambar 5. Citra Mikroskop Pengujian Korosi: (a) sampel dengan mikrokapsul; (b) sampel kontrol tanpa mikrokapsul

KESIMPULAN / CONCLUSION

Berdasarkan penelitian ini dapat disimpulkan bahwa dengan kecepatan pengadukan 1200 rpm didapatkan diameter rata-rata mikrokapsul terkecil yaitu sebesar 44,179 μm . Penggunaan surfaktan PVA/SDS 5:/1 menghasilkan mikrokapsul dengan diameter kecil dan berbentuk bulat jika dibandingkan dengan variasi lainnya yaitu sebesar 67,1822 μm . Hasil pengujian kinerja self-healing coating dan uji korosi pada permukaan plat steel membuktikan bahwa minyak biji rami

mampu memperbaiki kerusakan dengan mempersempit area goresan dan memperlambat proses korosi.

UCAPAN TERIMAKASIH / ACKNOWLEDGMENTS

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik STMI Jakarta yang telah memberikan dukungan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA / REFERENCES

- [1] S. Ataei, S. N. Khorasani, and R. E. Neisiany, "Biofriendly vegetable oil healing agents used for developing self-healing coatings: A review," *Prog. Org. Coatings*, vol. 129, no. September 2018, pp. 77–95, 2019, doi: 10.1016/j.porgcoat.2019.01.012.
- [2] A. C. M. Silva, R. A. Renzetti, A. de S. Andrada, P. Singh, P. K. Rohatgi, and M. C. da Silva, "Adapted synthesis routes and healing evaluation of a self-healing anticorrosive coating," *J. Coatings Technol. Res.*, vol. 17, no. 5, pp. 1351–1361, 2020, doi: 10.1007/s11998-020-00356-x.
- [3] J. Kothari and J. O. Iroh, "Self-Healing Poly(urea formaldehyde) Microcapsules: Synthesis and Characterization," 2023.
- [4] D. Y. Zhu, M. Z. Rong, and M. Q. Zhang, "Self-healing polymeric materials based on microencapsulated healing agents: From design to preparation," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 49–50, pp. 175–220, 2015, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2015.07.002.
- [5] H. Ullah, K. A. M. Azizli, Z. B. Man, M. B. Che Ismail, and M. I. Khan, "The potential of microencapsulated self-healing materials for microcracks recovery in self-healing composite systems: A review," *Polym. Rev.*, vol. 56, no. 3, pp. 429–485, 2016, doi: 10.1080/15583724.2015.1107098.
- [6] P. C. Calder, "Nutritional benefits of omega-3 fatty acids," *Food Enrich. with Omega-3 Fat. Acids*, pp. 3–26, 2013, doi: 10.1533/9780857098863.1.3.
- [7] T. Nesterova, K. Dam-Johansen, L. T. Pedersen, and S. Kiil, "Microcapsule-based self-healing anticorrosive coatings: Capsule size, coating formulation, and exposure testing," *Prog. Org. Coatings*, vol. 75, no. 4, pp. 309–318, 2012, doi: 10.1016/j.porgcoat.2012.08.002.
- [8] N. Z. Tomić, A. N. Mustapha, M. AlMheiri, N. AlShehhi, and A. Antunes, "Advanced application of drying oils in smart self-healing coatings for corrosion protection: Feasibility for industrial application," *Prog. Org. Coatings*, vol. 172, p. 107070, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.107070>.
- [9] R. I. D. Suyatmo, A. Topandi, L. O. Sari, and L. Nulhakim, "Pengaruh Penambahan Poli Vinil Alkohol (PVA) pada Enkapsulasi Minyak Kacang Kenari dalam Urea-Formaldehid untuk Aplikasi Self-Healing Coating," *J. Teknol.*, vol. 10, no. 2, 2023, doi: 10.31479/jtek.v10i2.226.
- [10] S. M. Mirabedini, M. Esfandeh, R. R. Farnood, and P. Rajabi, "Amino-silane surface modification of urea-formaldehyde microcapsules containing linseed oil for improved epoxy matrix compatibility. Part I: Optimizing silane treatment conditions," *Prog. Org. Coatings*, vol. 136, no. May, p. 105242, 2019, doi: 10.1016/j.porgcoat.2019.105242.
- [11] H. Abdipour, M. Rezaei, and F. Abbasi, "Synthesis and characterization of high durable linseed oil-urea formaldehyde micro/nanocapsules and their self-healing behaviour in epoxy coating," *Prog. Org. Coatings*, vol. 124, no. July, pp. 200–212, 2018, doi: 10.1016/j.porgcoat.2018.08.019.
- [12] M. Behzadnasab, M. Esfandeh, S. M. Mirabedini, M. J. Zohuriaan-Mehr, and R. R.

- Farnood, "Preparation and characterization of linseed oil-filled urea-formaldehyde microcapsules and their effect on mechanical properties of an epoxy-based coating," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 457, no. 1, pp. 16–26, 2014, doi: 10.1016/j.colsurfa.2014.05.033.
- [13] B. Bălănuță, R. Stan, A. Hanganu, and H. Iovu, "Novel linseed oil-based monomers: Synthesis and characterization," *UPB Sci. Bull. Ser. B Chem. Mater. Sci.*, vol. 76, no. 3, pp. 129–140, 2014.
- [14] H. Wang and Q. Zhou, "Evaluation and failure analysis of linseed oil encapsulated self-healing anticorrosive coating," *Prog. Org. Coatings*, vol. 118, no. November 2017, pp. 108–115, 2018, doi: 10.1016/j.porgcoat.2018.01.024.
- [15] N. Shahabudin, R. Yahya, and S. N. Gan, "Microcapsules of Poly(urea-formaldehyde) (PUF) Containing alkyd from Palm Oil," *Mater. Today Proc.*, vol. 3, no. Icfmd 2015, pp. S88–S95, 2016, doi: 10.1016/j.matpr.2016.01.012.
- [16] R. Inda, D. Suyatmo, A. Topandi, I. Gita, and C. Gultom, "Encapsulation of Walnut Oil in Urea-Formaldehyde for Self-Healing Coating : Effect of Mixing Speed," vol. 21, no. 2, pp. 52–59, 2023.
- [17] O. Nguon, F. Lagugné-Labarhet, F. A. Brandys, J. Li, and E. R. Gillies, "Microencapsulation by in situ Polymerization of Amino Resins," *Polym. Rev.*, vol. 58, no. 2, pp. 326–375, 2018, doi: 10.1080/15583724.2017.1364765.
- [18] N. Z. Tomić, A. N. Mustapha, M. AlMheiri, N. AlShehhi, and A. Antunes, "Advanced application of drying oils in smart self-healing coatings for corrosion protection: Feasibility for industrial application," *Prog. Org. Coatings*, vol. 172, no. August, 2022, doi: 10.1016/j.porgcoat.2022.107070.
- [19] Juita, B. Z. Dlugogorski, E. M. Kennedy, and J. C. Mackie, "Low temperature oxidation of linseed oil: a review," *Fire Sci. Rev.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–36, 2012, doi: 10.1186/2193-0414-1-3.
- [20] P. P. M. Rajendra S. Jadhav, Dilip G. Hundiware, "Synthesis and Characterization of Phenol-Formaldehyde Microcapsules Containing Linseed Oil and Its Use in Epoxy for Self-Healing and Anticorrosive Coating," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 119, pp. 2911–2916, 2011, doi: 10.1002/app.