

DOI: <http://dx.doi.org/10.15578/psnp.18305>

## Kinetika Curing dan Perilaku Pembentukan IPN pada *Blends* Termoset Epoksi-Poliester Tak Jenuh Untuk Aplikasi Pelapisan Kapal

### *Curing Kinetics and IPN Formation Behavior in Thermoset Epoxy–Unsaturated Polyester Blends For Marine Coating Applications*

Fahriadi Pakaya<sup>1\*</sup>, Yurika Nantan<sup>1</sup>, I Nyoman Subawa<sup>1</sup>, Marinus S. Tappy<sup>1</sup>, Raman GTH Simanjuntak<sup>1</sup>, M. Yusuf Syam<sup>2</sup>, Izhary Siregar<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Politeknik Kelautan dan Perikanan Bitung, Aertembaga Dua, Kota Bitung, 95526

<sup>2</sup>Politeknik Ahli Usaha Perikanan, Jl. AUP Pasar Minggu-Jakarta Selatan, 12520

<sup>3</sup>Politeknik Kelautan dan Perikanan Sidoarjo, Sidoarjo, 61253

\*Email: [fahriadi.pakaya@kkp.go.id](mailto:fahriadi.pakaya@kkp.go.id)

#### ABSTRAK

Campuran resin epoksi–poliester tak jenuh (UP) memiliki potensi sebagai material pelapisan lambung kapal kayu karena dapat mengombinasikan keunggulan mekanik epoksi dan laju curing cepat UP. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh variasi komposisi epoksi–UP terhadap kinetika curing, evolusi gugus fungsi, dan sifat mekanik, serta menentukan komposisi optimum untuk aplikasi pelapisan. Tujuh formulasi Epoksi:UP (100:0 hingga 0:100) dianalisis menggunakan pengukuran curing real-time, FTIR, dan uji kekerasan Shore D. Hasil menunjukkan bahwa penambahan 10% UP menghasilkan profil curing paling stabil, dengan suhu puncak eksoterm moderat dan waktu curing yang terkontrol. Analisis FTIR memperlihatkan konsumsi gugus epoksi dan vinil yang paling seimbang, peningkatan pita –OH dan C–O–C, serta indikasi pembentukan jaringan interpenetrating polymer network (IPN) yang lebih homogen. Pada fraksi UP tinggi, laju curing yang sangat cepat menyebabkan peningkatan viskositas dini, pembatasan mobilitas radikal, dan premature gelation, sehingga jaringan yang terbentuk kurang seragam. Uji kekerasan menunjukkan nilai tertinggi pada sampel EUP-1 dengan komposisi UP sebanyak 10% berat polimer (95.8 HD), menandakan densitas crosslink optimum. Oleh karena itu, komposisi Epoksi + 10% UP direkomendasikan sebagai formulasi terbaik karena memberikan keseimbangan antara laju curing, homogenitas jaringan, dan kekerasan permukaan, sehingga memenuhi kebutuhan performa pelapisan pada lingkungan maritim.

Kata kunci: analisis FTIR, epoksi-poliester tak jenuh, interpenetrating polymer network (IPN), kekerasan shore D, kinetika curing

#### ABSTRACT

*Epoxy–unsaturated polyester (UP) resin blends offer promising potential as protective coatings for wooden ship hulls by combining the high mechanical strength of epoxy with the fast curing characteristics of UP. This study investigates the effects of epoxy–UP composition on curing kinetics, functional group evolution, and mechanical performance to determine the optimal formulation for marine coating applications. Seven epoxy:UP ratios (100:0 to 0:100) were evaluated through real-time curing measurements, FTIR spectroscopy, and Shore D hardness*

testing. The addition of 10% UP produced the most stable curing profile, characterized by a moderate exothermic peak and controlled curing time. FTIR analysis revealed a balanced consumption of epoxide and vinyl groups, increased intensities of  $-OH$  and  $C-O-C$  bands, and evidence of a more homogeneous interpenetrating polymer network (IPN). At higher UP fractions, rapid radical polymerization led to early viscosity rise, restricted radical mobility, and premature gelation, resulting in less uniform network structures. The highest hardness (95.8 HD) was obtained at the epoxy + 10% UP composition, indicating an optimal crosslink density. Overall, the epoxy + 10% UP blend is recommended as the optimum formulation due to its balanced curing behavior, improved network homogeneity, and superior surface hardness suitable for maritime environments.

*Keywords: curing kinetics, epoxy-unsaturated polyester blends, FTIR analysis, interpenetrating polymer network (IPN), shore D hardness*

## PENDAHULUAN

Kapal kayu masih banyak digunakan dalam industri perikanan dan transportasi laut di Indonesia, namun paparan yang terus-menerus terhadap air laut, kelembapan tinggi, serta aktivitas mikroorganisme menyebabkan terjadinya degradasi struktural, penurunan kekuatan mekanik, dan kerusakan permukaan. Pelapisan berbasis *fiber-reinforced polymer* (FRP) dengan matriks poliester tak jenuh (UP) telah digunakan secara luas, namun material ini memiliki sejumlah keterbatasan seperti sifat getas, ketahanan retak yang rendah, dan daya rekat yang kurang optimal terhadap substrat kayu (Abdulkarim et al., 2024).

Epoksi memiliki sifat adhesi yang sangat baik, stabilitas termal tinggi, serta ketahanan kimia yang baik, sehingga memiliki potensi yang besar sebagai material pelapis struktural pada lingkungan laut (Fekiac et al., 2025; Zhao et al., 2025). Namun, epoksi murni memiliki viskositas tinggi, waktu curing relatif lama, serta biaya yang lebih tinggi dibandingkan resin lainnya (Saito et al., 2024). Sebaliknya, resin UP memiliki waktu curing cepat dan mudah pengaplikasiannya, tetapi bersifat lebih rapuh dan memiliki densitas ikatan silang yang lebih rendah dibanding epoksi (AbdulRahman et al., 2025; Akbari et al., 2025; Miah et al., 2022). Campuran resin epoksi dan UP melalui teknik polymer blending dianggap mampu menghasilkan keseimbangan sifat mekanik, adhesi, fleksibilitas, serta kestabilan termal yang lebih baik dibanding penggunaan resin tunggal (Ali et al., 2021; Mustapha et al., 2022; Pakaya et al., 2025).

Beberapa penelitian melaporkan bahwa pencampuran epoksi dan UP dapat membentuk jaringan *interpenetrating polymer network* (IPN) yang meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan terhadap degradasi lingkungan (Ahmad et al., 2025; Cardona et al., 2016; Farooq et al., 2020; Ganesh Gupta K et al., 2021). Namun, perbedaan mendasar pada mekanisme curing kedua resin termoset ini yakni ring-opening polymerization pada epoksi dan polimerisasi radikal bebas pada

UP memberikan tantangan tersendiri dalam mengontrol kinetika curing dan homogenitas jaringan crosslink (Seisedos et al., 2025). Ketidakseimbangan laju reaksi dapat menghasilkan struktur jaringan yang tidak seragam, terbentuknya fase rapuh, serta penurunan densitas crosslink pada rasio tertentu.

Kajian terbaru juga menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian tentang *blend* epoksi-poliester tak jenuh berfokus pada peningkatan sifat mekanik dan termal melalui teknik post-curing, penambahan nanofiller, atau modifikasi kimia, sementara studi mengenai perilaku curing real-time, kinetika eksotermik pada curing suhu ruang, dan hubungannya dengan pembentukan crosslink masih terbatas (Granado et al., 2018). Selain itu, belum terdapat kajian yang secara komprehensif mengaitkan fenomena curing dengan hasil FTIR dan sifat kekerasan untuk memetakan komposisi optimum yang relevan secara aplikatif sebagai material pelapis lambung kapal.

Berdasarkan gap tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi komposisi resin epoksi-poliester tak jenuh terhadap laju dan suhu curing, pembentukan ikatan silang, serta sifat kekerasan yang mencerminkan densitas crosslink. Melalui pemantauan curing secara real-time, analisis gugus fungsi dengan FTIR, dan pengujian kekerasan Shore D, penelitian ini diarahkan untuk mengidentifikasi komposisi yang menghasilkan keseimbangan terbaik antara stabilitas curing, pembentukan struktur polimer yang homogen, dan ketahanan mekanik. Temuan penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi penting bagi pengembangan material pelapis lambung kapal kayu yang lebih tahan terhadap lingkungan laut, memiliki adhesi yang baik, serta stabil secara termal.

## BAHAN DAN METODE

Penelitian ini menggunakan resin epoksi komersial tipe bisfenol-A dengan hardener poliamina sebagai sistem pengeras utama diperoleh dari toko lokal di Manado, Indonesia. Resin poliester tak jenuh (UP) tipe ortoftalat digunakan sebagai komponen kedua dalam sistem polymer blending. Metil etil keton peroksida (MEKP) digunakan sebagai katalis untuk inisiasi polimerisasi radikal bebas pada resin UP. Seluruh bahan digunakan dalam kondisi asli tanpa modifikasi tambahan untuk menjaga representasi aplikatif terhadap kondisi lapangan pelapisan lambung kapal kayu. Informasi komposisi dan karakteristik material mengacu pada lembar data teknis pabrikan.

### Formulasi dan Pencampuran Resin

Campuran resin disiapkan dalam tujuh variasi komposisi berdasarkan perbandingan massa resin epoksi dan UP sebagaimana tercantum pada Tabel 1.

Tabel 1. Variasi Komposisi Resin Epoksi – Poliester Tak Jenuh

Label	Epoksi (%)	Poliester (%)
EUP-0	100	0
EUP-1	90	10
EUP-2	80	20
EUP-3	70	30
EUP-4	60	40
EUP-5	50	50
EUP-10	0	100

Resin epoksi dicampurkan terlebih dahulu dengan hardener poliamina sesuai rasio stoikiometri 60:40. Untuk masing-masing formulasi, resin UP dicampurkan dengan MEKP sebanyak 1% berat sesuai standar curing poliester, kemudian kedua sistem dicampurkan secara perlahan hingga homogen. Proses pencampuran dilakukan pada suhu ruang (27–30°C) untuk mencegah pemicu eksoterm yang terlalu cepat.

#### Prosedur Curing dan Pengamatan Kinetika

Kinetika curing dianalisis berdasarkan waktu gelasi, waktu curing penuh, dan suhu puncak eksotermik. Setiap campuran resin dituangkan ke dalam wadah silinder berdiameter 50 mm. Pengukuran suhu curing dilakukan menggunakan termometer digital Termokopel Termometer Loger Dual Channel MS-6514 Logging MS 6514. Waktu gelasi dicatat ketika campuran mulai kehilangan kemampuan alir, sedangkan waktu curing penuh ditentukan dari titik ketika peningkatan suhu berhenti dan mencapai kondisi termal stabil. Kurva suhu vs waktu digunakan untuk mengevaluasi laju curing dan karakter termal masing-masing komposisi.

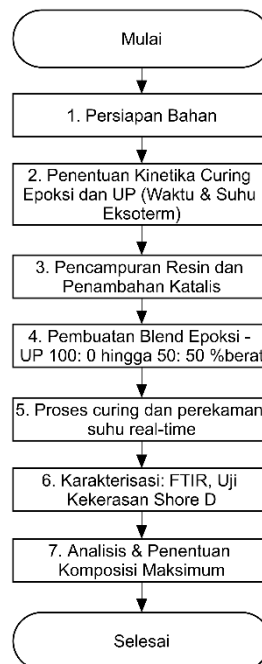
#### Karakterisasi Gugus Fungsi FTIR

Karakterisasi struktur kimia dilakukan menggunakan spektroskopi FTIR dengan metode attenuated total reflectance (ATR) pada rentang 4000–400  $\text{cm}^{-1}$ . Sampel yang telah mengeras dihancurkan menjadi serbuk halus untuk memastikan kontak yang baik antara permukaan sampel dan kristal ATR. Perubahan intensitas dan pergeseran puncak digunakan untuk mengidentifikasi mekanisme ko-curing serta pembentukan jaringan interpenetrating polymer network (IPN) pada berbagai komposisi.

#### Pengujian Kekerasan Shore D

Sifat mekanik berupa kekerasan permukaan diuji menggunakan durometer Shore D sesuai standar ASTM D2240. Sampel dicetak dalam bentuk lempeng datar dengan ketebalan 6-10 mm. Pengukuran dilakukan pada lima titik acak di setiap sampel, kemudian nilai rata-rata digunakan sebagai hasil akhir. Parameter ini digunakan untuk mengevaluasi densitas crosslink dan tingkat kekakuan jaringan polimer yang terbentuk pada setiap komposisi.

### Diagram Alir Penelitian



Gambar 1. Diagram alir proses penelitian yang meliputi persiapan bahan, formulasi resin epoksi-UP, proses curing real-time, karakterisasi FTIR dan kekerasan, serta analisis komposisi optimum.

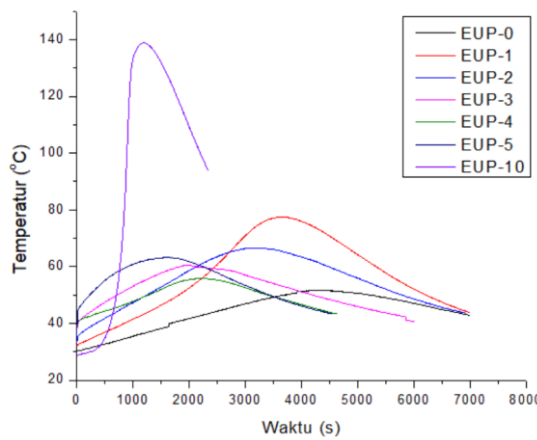
## HASIL DAN BAHASAN

### Kinetika Curing

Karakteristik curing secara langsung mengendalikan proses pembentukan jaringan polimer pada sistem termoset. Kinetika curing resin epoksi-poliester tak jenuh menunjukkan pola eksotermik yang sangat dipengaruhi oleh perbedaan mekanisme reaksi kedua resin. Epoksi murni menunjukkan suhu puncak eksoterm rendah ( $51.25^{\circ}\text{C}$ ) dengan waktu curing paling panjang (4300 detik), yang sesuai dengan mekanisme *ring-opening polymerization* yang berlangsung bertahap sehingga menghasilkan peningkatan suhu yang relatif moderat (Farsane et al., 2020). Sebaliknya, resin poliester tak jenuh menunjukkan curing yang jauh lebih cepat dan eksoterm yang sangat tinggi ( $138,85^{\circ}\text{C}$ ), akibat reaksi radikal bebas yang sangat sensitif terhadap katalis peroksida dan

kondisi termal (Ren & Tsai, 2021).

Perubahan perilaku curing menjadi lebih jelas ketika UP dicampurkan ke dalam resin epoksi. Pada komposisi Epoksi + 10% UP, suhu puncak meningkat menjadi 77.55 °C dan waktu curing menurun menjadi 3646 detik. Kondisi ini mencerminkan adanya interaksi sinergis antara mekanisme adisi epoksi dan polimerisasi radikal bebas UP. Untuk menggambarkan laju eksoterm dan perubahan profil reaksi, kurva kenaikan suhu saat curing untuk seluruh spesimen ditunjukkan pada Gambar 2, yang menunjukkan bagaimana setiap komposisi menghasilkan pola termal yang berbeda.



Gambar 2. Kurva kinetika curing resin epoksi–UP pada berbagai komposisi

Pada penambahan UP 20–50%, suhu puncak eksoterm justru menurun (66.55–55.85 °C) meskipun waktu curing semakin cepat (3177–1543 detik). Penurunan eksoterm ini mengindikasikan bahwa reaksi UP yang sangat cepat menyebabkan panas terdisipasi sebelum mencapai puncak tinggi. Kondisi curing yang terlalu cepat tersebut dapat memicu *premature gelation*, menurunkan homogenitas jaringan, dan mengurangi densitas ikatan silang yang terbentuk yang merupakan fenomena khas sistem radikal bebas dengan fraksi monomer tinggi. Nilai suhu puncak curing dan waktu curing untuk seluruh komposisi dirangkum pada Tabel 2, yang semakin menunjukkan interpretasi bahwa laju curing dipercepat signifikan dengan meningkatnya fraksi UP.

Tabel 2. Suhu Puncak dan Waktu Curing Campuran Epoksi-Poliester Tak Jenuh

No	Jenis Spesimen	Temperatur Maks. Curing (°C)	Waktu Maks. Curing (detik)
1	EUP-0	51.25	4300
2	EUP-1	77.55	3646
3	EUP-2	66.55	3177
4	EUP-3	60.55	1933

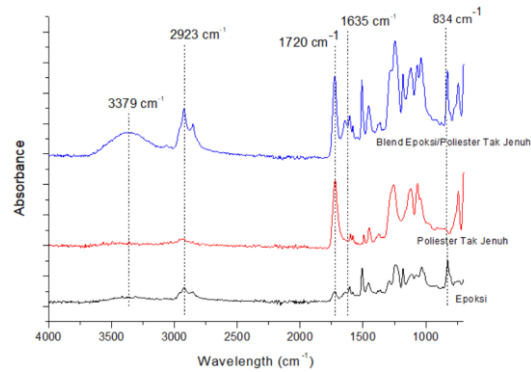
5	EUP-4	55.85	2183
6	EUP-5	63.25	1543
7	EUP-10	138.85	1190

Pada fraksi UP yang tinggi, fenomena *premature gelation* semakin jelas akibat interaksi beberapa faktor kinetik dan fisik dalam sistem. Peningkatan kandungan UP menyebabkan viskositas campuran meningkat lebih cepat selama tahap awal curing, sehingga membatasi mobilitas rantai polimer yang sedang berikatan. Ketika viskositas meningkat secara tajam, difusi radikal menjadi terbatas dan reaksi berlangsung secara lokal, bukan merata di seluruh volume resin. Pembatasan mobilitas (*mobility restriction*) ini memicu transisi cepat dari fase sol ke fase gel, sehingga jaringan terbentuk secara tidak homogen. Pada kondisi tersebut, pembentukan ikatan silang terjadi lebih cepat dibanding proses relaksasi rantai, menghasilkan struktur jaringan yang rapuh dan tidak seragam. Pola reaktivitas seperti ini umum ditemukan pada resin berbasis radikal bebas dengan laju polimerisasi tinggi dan juga menjelaskan penurunan kualitas mekanik pada sistem dengan fraksi UP yang semakin besar.

Hasil curing menunjukkan bahwa komposisi Epoksi + 10%berat UP (EUP-1) menghasilkan profil curing paling seimbang yakni waktu curing tidak terlalu lambat seperti epoksi murni, namun tidak terlalu cepat seperti UP murni. Curing moderat ini memberikan waktu kerja yang memadai dan memungkinkan pembentukan jaringan yang lebih seragam. Perubahan laju curing ini selanjutnya dikaji secara kimia melalui analisis FTIR pada subbab selanjutnya, untuk memverifikasi perubahan gugus epoksida dan vinil selama proses polimerisasi berlangsung.

### Analisis Gugus Fungsi FTIR

Analisis FTIR digunakan untuk mengaitkan perilaku curing dengan perubahan kimia dari gugus-gugus fungsi yang terlibat selama proses polimerisasi serta mengidentifikasi perubahan gugus fungsi utama selama proses curing serta mengkaji mekanisme pembentukan ikatan silang pada sistem resin epoksi-poliester tak jenuh. Perubahan paling signifikan terlihat pada pita epoksida  $834\text{--}915\text{ cm}^{-1}$ , yang menunjukkan penurunan intensitas secara bertahap pada seluruh sampel campuran. Penurunan ini mengindikasikan terjadinya pembukaan cincin epoksi sebagai tahap awal pembentukan jaringan tiga dimensi, sesuai dengan mekanisme curing epoksi yang dilaporkan oleh Smith (Smith, 2022). Variasi penurunan pita epoksida pada setiap komposisi divisualisasikan pada Gambar 3, yang memperlihatkan tingkat konversi epoksi yang berbeda pada masing-masing rasio Epoksi-UP.



Gambar 3. Spektrum FTIR epoksi, poliester tak jenuh, dan blend epoksi-UP setelah curing

Selain perubahan pada gugus epoksi, pita C=C vinil dari resin poliester tak jenuh pada 1635  $\text{cm}^{-1}$  juga mengalami penurunan intensitas yang jelas seiring meningkatnya fraksi UP. Penurunan ini menunjukkan terjadinya polimerisasi radikal bebas yang cepat, yang merupakan mekanisme utama curing UP. Pada komposisi UP menengah hingga tinggi, penurunan pita vinil terjadi lebih tajam, menandakan laju konsumsi ikatan rangkap yang jauh lebih tinggi dibanding sistem dengan fraksi UP rendah (Mustapha et al., 2022). Hal ini mendukung hasil curing pada subbab sebelumnya, yang menunjukkan percepatan laju reaksi pada komposisi dengan dominasi UP.

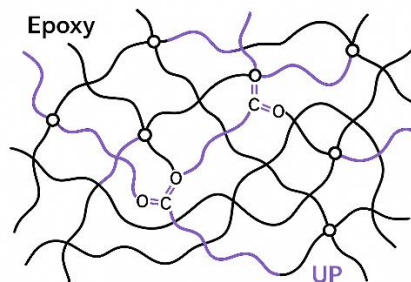
Perubahan lain yang signifikan adalah peningkatan intensitas pita –OH pada 3200–3600  $\text{cm}^{-1}$  dan pita C–O–C pada 1100–1250  $\text{cm}^{-1}$ . Kedua pita ini mengindikasikan pembentukan ikatan baru hasil reaksi pembukaan cincin epoksi dan pembentukan ikatan eter selama proses curing berlangsung. Perubahan pita karbonil pada 1720  $\text{cm}^{-1}$  juga terlihat pada semua blend, mengindikasikan adanya interaksi antara segmen poliester dan produk reaksi epoksi. Ringkasan perubahan intensitas dan posisi pita gugus fungsi utama ditunjukkan pada Tabel 3, yang memudahkan identifikasi jalur reaksi dominan pada tiap komposisi resin.

Tabel 3. Perubahan Puncak FTIR Utama pada Epoksi, UP, dan Blend Epoksi–UP

No	Bilangan Gelombang ( $\text{cm}^{-1}$ )	Penugasan Gugus Fungsi	Epoksi	UP	Blend Epoksi–UP	Interpretasi Reaksi
1	3379 $\text{cm}^{-1}$	Regangan O–H	Rendah	Rendah	Meningkat	Terbentuknya –OH akibat pembukaan cincin epoksida
2	2923 $\text{cm}^{-1}$	C–H alifatik	Ada	Ada	Tidak berubah signifikan	Komponen backbone kedua resin
3	1720 $\text{cm}^{-1}$	Regangan C=O poliester	Tidak ada	Kuat	Sedikit bergeser / berubah	Interaksi C=O dengan –OH dan eter epoksi

4	1635 cm <sup>-1</sup>	C=C vinil (UP)	Tidak ada	Kuat	Menurun signifikan	Konsumsi ikatan rangkap selama curing UP
5	1250–1100 cm <sup>-1</sup>	Regangan C–O–C (eter)	Ada	Lemah	Menguat	Pembentukan ikatan eter hasil reaksi epoksi
6	834 cm <sup>-1</sup>	Cincin epoksida (epoxy ring vibration)	Kuat	Tidak ada	Menurun tajam	Pembukaan cincin epoksi selama curing

Berdasarkan perubahan pita gugus fungsi tersebut berupa penurunan epoksida, penurunan vinil, peningkatan –OH dan C–O–C, dapat disimpulkan bahwa campuran epoksi-UP mengalami pembentukan interpenetrating polymer network (IPN). Pada kondisi dengan fraksi UP rendah (10–20%), jalur reaksi kedua resin berlangsung lebih seimbang, sehingga menghasilkan struktur jaringan yang lebih homogen. Representasi skematis mekanisme interaksi dan pembentukan jaringan IPN pada sistem resin campuran ditampilkan pada Gambar 4, yang menggambarkan bagaimana kedua jaringan polimer tumbuh dan saling menembus selama tahap curing.



Gambar 4. Model IPN Epoksi-Poliester Tak jenuh

Analisis FTIR menunjukkan bahwa sampel EUP-1 memiliki keseimbangan terbaik antara konsumsi gugus epoksi dan vinil, pembentukan ikatan eter, serta pertumbuhan jaringan IPN. Temuan ini mendukung interpretasi bahwa komposisi tersebut berpotensi menghasilkan karakter mekanik yang lebih baik, yang dibahas lebih lanjut pada subbab berikutnya.

#### Uji Kekerasan Shore D

Pengujian kekerasan Shore D digunakan untuk mengevaluasi ketahanan permukaan resin terhadap deformasi dan untuk mengonfirmasi pengaruh variasi komposisi terhadap densitas ikatan silang yang terbentuk. Nilai kekerasan yang diperoleh menunjukkan pola non-linear terhadap peningkatan fraksi UP. Epoksi murni memiliki kekerasan tinggi (95 HD), mencerminkan densitas

crosslink yang besar akibat mekanisme pembukaan cincin epoksida yang menghasilkan jaringan tiga dimensi yang padat (Moller et al., 2020; Shundo et al., 2022). Ringkasan lengkap nilai kekerasan untuk setiap variasi komposisi ditunjukkan pada Tabel 4, yang memperlihatkan perbedaan resistansi permukaan akibat perubahan rasio resin.

Tabel 4. Nilai Kekerasan Shore D pada berbagai Komposisi Campuran Epoksi-Poliester Tak Jenuh

Label	Nilai Kekerasan (HD)
EUP-0	95
EUP-1	95.8
EUP-2	92
EUP-3	85
EUP-4	83
EUP-5	75
EUP-10	77

Peningkatan kekerasan tertinggi dicapai pada komposisi Epoksi + 10% UP (95.8 HD) pada sampel EUP-1, sedikit lebih tinggi dibanding epoksi murni. Kenaikan ini menunjukkan bahwa fraksi UP rendah menghasilkan efek penguatan melalui mekanisme ko-curing yang lebih seimbang, di mana pembentukan ikatan radikal UP berjalan cukup lambat untuk mengimbangi reaksi epoksi sehingga menghasilkan jaringan yang lebih homogen. Hal ini konsisten dengan hasil FTIR pada subbab sebelumnya, yang menunjukkan pembentukan ikatan eter dan peningkatan pita  $-OH$ , indikasi terbentuknya struktur IPN yang lebih teratur pada fraksi UP rendah.

Pada komposisi UP  $\geq 20\%$ , nilai kekerasan cenderung menurun (92–75 HD). Penurunan ini mengindikasikan bahwa peningkatan fraksi UP menyebabkan laju polimerisasi radikal bebas menjadi terlalu cepat sehingga menyebabkan premature gelation dan pembentukan jaringan yang tidak homogen. Kondisi curing yang terlalu cepat, sebagaimana ditunjukkan pada subbab 3.1, dapat menghambat pembentukan struktur crosslink yang merata dan menurunkan ketahanan mekanik. Fenomena serupa juga dilaporkan oleh Zhang, yang menunjukkan bahwa hybrid termoset dengan laju curing tinggi cenderung memiliki kekerasan lebih rendah akibat distribusi jaringan yang tidak seragam (Zhang et al., 2009).

Kekerasan terendah diperoleh pada UP murni (77 HD), yang konsisten dengan literatur bahwa poliester tak jenuh memiliki densitas crosslink lebih rendah dibanding epoksi dan cenderung menghasilkan permukaan yang lebih lunak (Chu et al., 2025). Pola ini menegaskan bahwa tingkat kekerasan tidak hanya ditentukan oleh fraksi resin tertentu, tetapi juga oleh keseragaman jaringan dan keseimbangan laju reaksi kimia selama curing.

Komposisi Epoksi + 10% UP merupakan formulasi optimum untuk menghasilkan

permukaan yang keras dan tahan abrasi. Hasil ini sejalan dengan interpretasi curing dan FTIR, yang menunjukkan bahwa fraksi UP rendah menghasilkan reaktivitas paling seimbang dan struktur jaringan yang paling homogen.

#### Keterkaitan Kinetika Curing, Struktur Kimia, dan Sifat Mekanik

Integrasi hasil curing, FTIR, dan pengujian kekerasan menunjukkan hubungan yang kuat antara mekanisme kimia, perilaku termal, dan performa mekanik pada *blending* polimer resin epoksi-poliester tak jenuh. Data curing mengindikasikan bahwa penambahan UP dalam jumlah kecil (10%) menghasilkan laju curing yang moderat dengan suhu puncak eksoterm yang tidak terlalu tinggi. Kondisi curing yang stabil ini penting untuk memberikan waktu reaksi yang cukup sehingga proses pembentukan ikatan silang dapat berlangsung secara merata. Curing yang terlalu cepat, seperti pada fraksi UP tinggi, berpotensi menyebabkan akumulasi panas yang tidak terkontrol dan *premature gelation*, yang kemudian berdampak negatif pada homogenitas jaringan polimer.

Temuan dari FTIR mendukung pola curing ini. Pada fraksi UP rendah, terlihat konsumsi gugus epoksida dan vinil yang seimbang, disertai peningkatan intensitas pita –OH dan C–O–C. Perubahan pita ini menunjukkan terjadinya pembentukan ikatan eter, reaksi lanjutan dari pembukaan cincin epoksi, serta terbentuknya jaringan IPN yang lebih seragam. Sebaliknya, pada fraksi UP tinggi, penurunan tajam pada pita vinil menunjukkan laju polimerisasi radikal bebas yang sangat cepat, yang cenderung menghasilkan jaringan dengan distribusi ikatan silang yang kurang merata.

Hubungan struktur–sifat ini tercermin jelas pada data kekerasan Shore D. Komposisi Epoksi + 10% UP menunjukkan kekerasan tertinggi karena memiliki jaringan *crosslink* paling homogen, sejalan dengan pola curing moderat dan pembentukan jalur reaksi yang seimbang. Pada fraksi UP tinggi, kekerasan menurun karena peningkatan laju curing yang menyebabkan terbentuknya struktur jaringan yang lebih rapuh dan tidak beraturan. Model perilaku ini konsisten dengan literatur yang menekankan pentingnya distribusi *crosslink* yang seragam dalam menentukan ketahanan mekanik resin termoset.

Integrasi seluruh hasil menunjukkan bahwa komposisi Epoksi + 10% UP memiliki mekanisme curing paling seimbang, pembentukan jaringan IPN paling seragam, dan kemampuan mekanik tertinggi. Keterkaitan antara stabilitas termal, perubahan gugus fungsi, dan densitas ikatan silang menjadikan komposisi ini sebagai kandidat paling optimal untuk aplikasi pelapisan

lambung kapal kayu, di mana ketahanan permukaan, kekerasan, dan stabilitas jaringan sangat diperlukan untuk menghadapi lingkungan maritim.

## SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi komposisi resin epoksi-poliester tak jenuh secara signifikan memengaruhi perilaku curing, perubahan gugus fungsi, dan performa mekanik material hasil curing. Penambahan UP dalam jumlah kecil (10%) menghasilkan sifat curing yang paling stabil, ditandai oleh suhu puncak eksoterm moderat dan waktu curing yang tidak terlalu cepat maupun terlalu lambat. Kondisi curing moderat ini memungkinkan proses pembentukan jaringan berlangsung lebih merata dibandingkan epoksi murni maupun UP murni. Analisis FTIR mengonfirmasi bahwa komposisi Epoksi + 10% UP memiliki keseimbangan terbaik antara konsumsi gugus epoksida dan vinil, disertai peningkatan pita  $-OH$  dan  $C-O-C$  yang mengindikasikan terbentuknya jaringan interpenetrating polymer network (IPN) yang lebih homogen. Sebaliknya, fraksi UP tinggi menunjukkan pola konsumsi gugus vinil yang sangat cepat, yang berpotensi menghasilkan struktur jaringan yang tidak seragam. Pengujian kekerasan Shore D menunjukkan bahwa komposisi Epoksi + 10% UP memiliki kekerasan tertinggi, mengindikasikan densitas ikatan silang yang lebih baik dan distribusi struktur yang lebih homogen. Penurunan kekerasan pada fraksi UP menengah hingga tinggi berkaitan dengan laju curing yang terlalu cepat dan pembentukan jaringan yang tidak merata. Komposisi Epoksi + 10% UP dapat direkomendasikan sebagai formulasi optimum untuk aplikasi pelapisan lambung kapal kayu. Formulasi ini memberikan keseimbangan terbaik antara stabilitas curing, homogenitas struktur jaringan, dan kekerasan permukaan, yang sangat penting untuk ketahanan mekanik dan abrasi pada lingkungan maritim.

## PERSANTUNAN

Terima kasih kami sampaikan kepada Kementerian Kelautan dan Perikanan yang telah mendanai kegiatan penelitian kami melalui skema BIMA KKP Tahun 2024. Kami juga berterima kasih kepada Pusat Pendidikan KP dan Politeknik Kelautan dan Perikanan Bitung yang telah memfasilitasi kegiatan penelitian kami.

## DAFTAR PUSTAKA

Abdulkarim, F., El, T., & Abu-jdayil, B. (2024). Case Studies in Chemical and Environmental Engineering Impact of crumb rubber on the performance of unsaturated polyester-dune sand mortar. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10(September), 100931. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100931>

- AbdulRahman, Jeemol Poovathungal, Reghunadhan Nair, Chethrappilly Padmanabhan, & Mathew, Suresh. (2025). A drive towards green – Unsaturated polyester resins: A critical review of bio-based building blocks and reactive diluents. *Polymers from Renewable Resources*, 16(2–3), 123–156. <https://doi.org/10.1177/20412479251338506>
- Ahmad, H., Abid, M. H., Gazo-Hanna, E., Shah, A. U. R., Ghumman, I. S. S., Arif, S., Naseem, M. S., & Zohaib, H. M. (2025). Investigating mechanical properties of composites reinforced with jute/cotton natural fibers in hybridized epoxy/vinylester and epoxy/polyester resins. *Polymer Composites*, 46(10), 9400–9409. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pc.29565>
- Akbari, S., Joseph, J. T., Skrifvars, M., Ramamoorthy, S. K., & Åkesson, D. (2025). Glass Fiber Reinforced Composite Produced with a Novel Matrix of Bio-based Unsaturated Polyester Resin made from 2,5-Furan Dicarboxylic Acid and Isosorbide. *Journal of Polymers and the Environment*, 33(6), 2798–2812. <https://doi.org/10.1007/s10924-025-03539-y>
- Ali, A. M., Jaber, M. A., & Toama, N. A. (2021). Thermal properties of polyester/epoxy blend. *Iraqi Journal of Science*, 62(4), 1128–1134. <https://doi.org/10.24996/ijs.2021.62.4.9>
- Cardona, F., Sultan, M. T., Abu, R., & Ezzah, F. (2016). Interpenetrating Polymer Network (IPN) with Epoxidized and Acrylated Bioresins and their Composites with Glass and Jute Fibres. *BioResources*, 11, 2820–2838. <https://doi.org/10.15376/biores.11.1.2820-2838>
- Chu, F., Hu, Y., Hu, W., Song, L., & Hu, Y. (2025). Advancements in monomers and reinforcements of unsaturated polyester composites: Traditional, bio-based, and flame-retardant types. *Composites Part B: Engineering*, 294, 112171. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.112171>
- Farooq, U., Teuwen, J., & Dransfeld, C. (2020). Toughening of Epoxy Systems with Interpenetrating Polymer Network (IPN): A Review. *Polymers*, 12(9), 1908. <https://doi.org/10.3390/polym12091908>
- Farsane, M., Soufia, L., Anouar, A., Chah, S., Dagdag, S., & Bouzziri, M. (2020). Experimental Evaluation of the Curing of Unsaturated Polyester Resin at Various Amounts of Methyl Ethyl Ketone Peroxide, Cobalt Octoate and Porcelain Powder. *Revista de Chimie*, 71(10), 58–66. <https://doi.org/10.37358/RC.20.10.8350>
- Fekiac, J. J., Krbata, M., Kohutiar, M., Janík, R., Kakošová, L., Breznická, A., Eckert, M., & Mikuš, P. (2025). Comprehensive Review: Optimization of Epoxy Composites, Mechanical Properties, & Technological Trends. *Polymers*, 17, 1–39. <https://doi.org/10.3390/polym17030271>
- Ganesh Gupta K, B. N. V. S., Hiremath, M. M., Ray, B. C., & Prusty, R. K. (2021). Improved mechanical responses of GFRP composites with epoxy-vinyl ester interpenetrating polymer network. *Polymer Testing*, 93, 107008. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.107008>
- Granado, L., Kempa, S., Gregoriades, L. J., Brüning, F., Genix, A.-C., Fréty, N., & Anglaret, E. (2018). Kinetic regimes in the curing process of epoxy-phenol composites. *Thermochimica Acta*, 667, 185–192. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2018.07.019>

- Miah, M. H., Chand, D. S., Rahul, B., & Malhi, G. S. (2022). Mechanical behavior of unsaturated polyester toughened epoxy hybrid polymer network reinforced with glass fibre. *Materials Today: Proceedings*, 56, 669–674. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.069>
- Moller, J. C., Berry, R. J., & Foster, H. A. (2020). On the Nature of Epoxy Resin Post-Curing. In *Polymers* (Vol. 12, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/polym12020466>
- Mustapha, Siti Noor Hidayah, Rahmat, Abdul Razak, & Mustapha, Rohani. (2022). Interactions and performance analysis of epoxidized palm oil/unsaturated polyester resin: Mechanical, thermal, and thermo-mechanical properties. *Polymers and Polymer Composites*, 30, 09673911221095704. <https://doi.org/10.1177/09673911221095704>
- Pakaya, F., Nantan, Y., Tappy, M. S., Simanjuntak, R. G., Syam, M. Y., Siregar, I., Subawa, I. N., & Urun, W. Y. K. (2025). Epoxy / unsaturated polyester blends via post-curing process for marine applications. *Teknika: Jurnal Sains Dan Teknologi*, 21(01), 79–90. <https://doi.org/10.62870/tjst.v21i1.29745>
- Ren, K., & Tsai, Y. (2021). Thermal Hazard Characteristics of Unsaturated Polyester Resin Mixed with Hardeners. *Polymers*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/polym13040522>
- Saito, S., Sato, S., & Arao, Y. (2024). The effect of processing / curing temperature and viscosity of epoxy resins on the flexural / tensile properties of GNP-epoxy resin nanocomposites. *Composites Part A*, 183(April), 108222. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108222>
- Seiseddos, G., Viamontes, E., Salazar, E., Pantea, C., Davis, E. S., Rockward, T., & Boesl, B. (2025). Real-time non-destructive characterization of epoxy resin curing kinetics and mechanical response for enhanced manufacturing quality control. *Polymer Testing*, 143, 108678. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108678>
- Shundo, A., Yamamoto, S., & Tanaka, K. (2022). Network Formation and Physical Properties of Epoxy Resins for Future Practical Applications. *JACS Au*, 2(7), 1522–1542. <https://doi.org/10.1021/jacsau.2c00120>
- Smith, B. (2022). The Infrared Spectra of Polymers V: Epoxies. *Spectroscopy*, 37, 17–19. <https://www.spectroscopyonline.com/view/the-infrared-spectra-of-polymers-v-epoxies>
- Zhang, J., Xu, Y. C., & Huang, P. (2009). Effect of cure cycle on curing process and hardness for. *EXPRESS Polymer Letters*, 3(9), 534–541. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2009.67>
- Zhao, Y., Yan, M., Jia, L., Zhang, F., Sun, L., Zhang, C., Gu, C., Liu, B., Fan, Q., Zhang, S., Jian, X., & Weng, Z. (2025). Improving the comprehensive performances of epoxy coatings via poly(phthalazinone ether) modification. *Applied Surface Science*, 714, 164465. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.164465>