

**EVALUASI BUSA POLIURETAN FLEKSIBEL *BIODEGRADABLE*  
BERBASIS POLIOL MINYAK KELAPA SAWIT: KEMAMPUAN  
BIODEGRADASI DALAM AIR LAUT**

***EVALUATION OF BIODEGRADABLE PALM OIL POLYOL-BASED  
FLEXIBLE POLYURETHANE FOAM: BIODEGRADABILITY  
IN SEAWATER***

**Neswati\*, Kurnia Harlina Dewi, Anggun Ayu Selvia, dan Tri Larasati**

Departemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Andalas, Sumatera Barat, Indonesia

\*Email korespondensi: neswati@ae.unand.ac.id

Diterima 13-11-2023, diperbaiki 12-05-2025, disetujui 26-05-2025

**ABSTRACT**

*The main raw material of flexible polyurethane foam (PUF) is polyols derived from petroleum derivatives. These polyols take a long time to decompose. The synthesis of PUF from palm oil polyols can improve its biodegradability. This study aimed to examine the biodegradation ability of palm oil polyol-based PUFs in seawater. Palm oil was converted into polyols through epoxidation and hydroxylation reactions. Palm oil polyols were substituted with PEG-400 and commercial polyols to improve PUF characteristics. The polyol systems (palm oil polyol 60%:PEG-400 40%; palm oil polyol 50%:PEG-400 50%; palm oil polyol 60%:commercial polyol 40%; palm oil polyol 50%:commercial polyol 50%) were reacted with TDI to form PUFs. The treatments in this study were PUFs with different polyol compositions (PUF1, PUF2, PUF3, PUF4, and Control). PUF was biodegraded in seawater for 30 days. The results showed that PUF1 had the highest biodegradability in seawater, with a weight loss of 44%. FTIR showed that the ester bond in PUF1 has been broken down and the absorption peak of the isocyanate group (-NCO) has disappeared due to the biodegradation. XRD identified the presence of PEG-400 crystals, which took time to decompose. However, PEG-400 was more biodegradable than commercial polyols. SEM showed that the surface of PUF1 became rough and the foam cell skeleton was damaged.*

**Keywords:** *biodegradation, flexible polyurethane foam, palm oil, PEG-400, seawater*

**ABSTRAK**

Bahan baku utama busa poliuretan fleksibel (PUF) adalah polioliol yang berasal dari turunan minyak bumi. Polioliol tersebut membutuhkan waktu lama untuk terurai. Sintesis PUF dari polioliol minyak kelapa sawit dapat meningkatkan kemampuan biodegradasinya. Penelitian ini bertujuan untuk menguji kemampuan biodegradasi PUF berbasis polioliol minyak kelapa sawit dalam air laut. Minyak kelapa sawit diubah menjadi polioliol melalui reaksi epoksidasi dan hidroksilasi. Polioliol minyak kelapa sawit disubstitusi dengan PEG-400 dan polioliol komersial untuk meningkatkan karakteristik PUF. Sistem polioliol (polioliol minyak kelapa sawit 60%:PEG-400 40%; polioliol minyak kelapa sawit 50%:PEG-400 50%; polioliol minyak kelapa sawit 60%:polioliol komersial 40%; polioliol minyak kelapa sawit 50%:polioliol komersial 50%) direaksikan dengan toluen diisosiyanat (TDI) untuk membentuk PUF. Perlakuan pada penelitian ini adalah PUF dengan komposisi polioliol yang berbeda (PUF1, PUF2, PUF3, PUF4, dan Kontrol). PUF dilakukan biodegradasi di dalam air laut selama 30

hari. Penurunan berat sampel busa diukur setiap lima hari. Pengamatan FTIR, XRD, TGA, dan SEM dilakukan setelah sampel terurai selama 30 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa PUF1 memiliki kemampuan biodegradasi tertinggi dalam air laut, dengan susut berat sebesar 44%. FTIR menunjukkan bahwa ikatan ester pada PUF1 telah terurai dan menghilangnya puncak serapan gugus isosianat (-NCO) akibat proses biodegradasi. XRD mengidentifikasi adanya kristal PEG-400 yang membutuhkan waktu untuk terurai. Namun PEG-400 lebih mudah terurai dibandingkan poliol komersial. SEM menunjukkan bahwa permukaan PUF1 menjadi kasar dan kerangka sel busa menjadi rusak.

**Kata kunci:** air laut, biodegradasi, busa poliuretan fleksibel, minyak kelapa sawit, PEG-400

## PENDAHULUAN

Poliuretan dibentuk oleh kondensasi poliisocyanat dan poliol serta merupakan *heteropolymer*. Poliuretan adalah bahan polimer yang sangat penting untuk industri busa, elastomer, pelapis, adesif dan serat (De Souza et al., 2021). Pangsa pasar terbesar dari produk poliuretan adalah busa poliuretan sebesar 65% (Uram et al., 2021). Busa poliuretan terdiri dari tiga jenis yaitu busa poliuretan fleksibel, semi kaku, dan kaku. Jenis busa poliuretan ditentukan oleh komposisi segmen keras dan segmen lunak yang mempengaruhi sifat mekanisnya. Segmen keras secara fisik memiliki ikatan silang yang berperan dalam memberikan sifat kaku pada busa, sedangkan segmen lunak memberikan sifat elastis pada busa. Permintaan terhadap busa poliuretan fleksibel (PUF) semakin meningkat seiring dengan peningkatan industri furnitur, karpet, kasur, konstruksi, pengemasan dan interior *automotive* karena memiliki densitas rendah, elastis dan kuat (Nabipour et al., 2020; Choi & Kim, 2020; Jia et al., 2022).

PUF konvensional merupakan plastik sintetis yang memiliki laju biodegradasi yang rendah. PUF konvensional menggunakan poliol dari turunan minyak bumi sebagai bahan bakunya. Masalah lingkungan yang disebabkan oleh PUF konvensional dapat diatasi dengan menggantikan poliol dari turunan minyak bumi dengan poliol dari biomassa seperti trigliserida (minyak), karbohidrat, polifenol (lignin dan tanin), dan limbah-limbah organik (seperti

gliserol mentah) (Peyrton & Avérous, 2021). Minyak nabati cukup potensial dikembangkan sebagai sumber poliol karena metode konversi menjadi poliol yang lebih sederhana (Contreras et al., 2020). Minyak nabati yang diusahakan dalam skala industri besar di Indonesia adalah minyak kelapa sawit. Ketersediaan minyak kelapa sawit yang cukup banyak, harga murah, dan komposisi asam lemak tidak jenuh yang cukup tinggi menyebabkan minyak kelapa sawit dapat dijadikan sebagai sumber poliol yang ramah lingkungan.

Prociak et al. (2018) menjelaskan bahwa poliol minyak kelapa sawit memiliki bilangan hidroksil lebih dari 100 mg KOH/g sehingga PUF dapat dihasilkan dari poliol minyak kelapa sawit dengan komposisi maksimal 20% dari campuran poliol. Firdaus (2014) menjelaskan bahwa poliol dengan bilangan hidroksil lebih rendah dari 100 mg KOH/g merupakan bahan utama dalam mensintesis PUF. Peneliti telah berhasil mengkonversi minyak kelapa sawit menjadi poliol dengan bilangan hidroksil lebih rendah dari 100 mg KOH/g melalui pengendalian reaksi hidroksilasi sehingga komposisi poliol minyak kelapa sawit yang digunakan untuk mensintesis PUF menjadi lebih meningkat. Berdasarkan percobaan yang dilakukan komposisi poliol minyak kelapa sawit sebesar 50% dan 60% dari campuran poliol menghasilkan PUF dengan karakteristik mendekati produk komersial (fleksibel dan mengembang). PUF tersebut disintesis dari poliol dengan komposisi poliol

minyak kelapa sawit 60%:PEG-400 40% (PUF1); polioli minyak kelapa sawit 50%:PEG-400 50% (PUF2); polioli minyak kelapa sawit 60%:polioli komersial 40% (PUF3) dan polioli minyak kelapa sawit 50%:polioli komersial 50% (PUF4) (Neswati et al., 2023). Namun kemampuan biodegradasi PUF dari keempat formula baru ini belum diketahui sehingga perlu dilakukan kajian lebih lanjut.

Biodegradasi merupakan penguraian suatu zat oleh mikroorganisme atau enzim. Proses ini mengakibatkan pemendekan rantai polimer dan hilangnya beberapa bagian sehingga berkurangnya berat molekul polimer dan bahkan dapat mengakibatkan mineralisasi lengkap dari material yang terdegradasi (Xu & Hong, 2022). Namun, degradasi lengkap polimer yang lebih besar biasanya memerlukan kerja sama beberapa mikroorganisme berbeda. Proses ini dapat terdiri dari beberapa tahap, yaitu: pemecahan polimer menjadi monomer, reduksi menjadi senyawa yang lebih sederhana, dan degradasi akhir menjadi karbon dioksida, air, dan metana (dalam kondisi anaerobik) (Lim et al., 2023).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menguji kemampuan biodegradasi PUF berbasis polioli minyak kelapa sawit dalam air laut. Penelitian sebelumnya lebih fokus pada biodegradasi bioplastik, polietilen (PE), dan *low density* polietilen (LDPE) dalam air laut (Briassoulis et al., 2020; Dimassi et al., 2024). Hasil penelusuran literatur belum ditemukan penelitian tentang biodegradasi busa poliuretana fleksibel berbasis polioli minyak kelapa sawit dalam air laut. Pradana & Galib (2021) menyatakan bahwa air laut dapat berfungsi sebagai media degradasi polimer, di mana keberadaan mikroorganisme dalam ekosistem tersebut dapat berperan aktif dalam proses biodegradasi. Hal ini menunjukkan bahwa lingkungan laut berpotensi dimanfaatkan untuk menguji

biodegradasi busa poliuretana fleksibel yang disintesis dari polioli minyak kelapa sawit, karena struktur alami dari polioli nabati cenderung lebih mudah diuraikan oleh mikroorganisme dibandingkan polioli turunan minyak bumi.

## METODE PENELITIAN

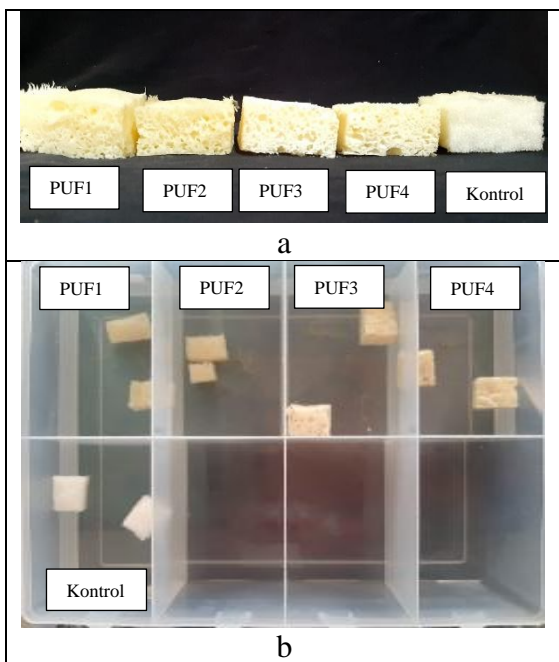
Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah minyak kelapa sawit komersial, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 50% dari Bratachem, asam asetat 100% dari Merc, asam sulfat 98% dari Smart Lab, etilen glikol dari Bratachem, sodium bikarbonat dari Merc, HBr dari Merc, KOH dari Merc, katalis DABCO BLV dari Shandong Tonglan Chemical Co., Ltd., katalis DABCO T-9 dari Tianjin Hutong Global Trade Co., Ltd., minyak silikon dari Hubei Star Chem Co., Ltd., TDI 80 dari Shandong Baovi Energy Technology Co., Ltd., aquades, metilen klorida dari Dow, dietilen glikol dari Merc, isopropanol dari Bratachem, polietilen glikol-400 dari Subur Kimia Jaya, polioli komersial dari Toko *Online*, dan air laut di ambil dari Pantai Purus, Kelurahan Purus, Kecamatan Padang Barat, Kota Padang Sumatera Barat (Gambar 1). Alat yang digunakan untuk penelitian ini adalah pendingin tegak, labu didih leher tiga, *hot plate magnetic stirrer*, viscometer Brookfield, cetakan silikon busa, wadah biodegradasi, FTIR merk Perkin Elmer, SEM merk Hitachi S-3400N, *X-Ray Diffraction* (XRD) tipe X'Pert PRO merk PANalytical MPD PW3040/60, dan *thermal analyzer* DTG-60 merk Shimadzu.

Prosedur sintesis PUF berdasarkan penelitian Neswati et al. (2023), selanjutnya dilakukan biodegradasi dengan memotong sampel PUF 2,5x1,5x1 cm<sup>3</sup> ditimbang beratnya. Sampel PUF dimasukkan ke dalam media biodegradasi air laut (Gambar 2) dan diinkubasi pada suhu ruang. Media biodegradasi air laut memiliki pH 8,2. Pengamatan susut berat

dilakukan selama 1 bulan dengan interval waktu 5, 10, 15, 20, 25, dan 30 hari. Pada hari ke-30 semua sampel PUF dan kontrol diamati dengan menggunakan alat FTIR, XRD, SEM, dan TGA .



**Gambar 1.** Peta Pantai Purus, Kota Padang Sumbar



**Gambar 2.** a) Sampel PUF dan Kontrol, dan (b) Biodegradasi Sampel PUF dan Kontrol dalam Air Laut

**Susut Berat**

Susut berat dihitung berdasarkan prosedur yang digunakan Asakura et al. (2021) dengan rumus:

$$\text{Susut berat (\%)} = \frac{W_o - W_t}{W_o} \times 100$$

W<sub>o</sub> = berat sampel sebelum biodegradasi;

W<sub>t</sub> = berat sampel setelah biodegradasi waktu ke-t

**Fourier Transform Infra Red (FTIR)**

FTIR yang digunakan pada penelitian ini adalah merk Perkin Elmer. Metode analisisnya berpedoman pada Rao et al. (2018). Tujuan melakukan pengamatan dengan FTIR adalah untuk mengetahui karakteristik gugus fungsional dari sampel. Spektrum FTIR dapat diperoleh dengan menggunakan spektrofotometer FTIR pada panjang gelombang 500 - 4000 cm<sup>-1</sup>.

- Jika sampel berwujud cair, maka sampel dipipet, disuntikkan atau diteteskan ke dalam sel inframerah berjendela kristal KBr dan kemudian dianalisis.

- Sampel berwujud padat diukur dengan menggunakan metode Pelet KBr. Sampel yang akan dianalisis dihaluskan dengan mortar sebanyak 1-10 mg sampai ukuran kurang dari 2 μm kemudian ditambahkan dengan bubuk KBr sebanyak 100 mg sampai tercampur rata. Campuran ini kemudian ditempatkan dalam cetakan dan ditekan sampai 7 – 8 ton dengan menggunakan alat tekanan mekanik. Tekanan ini dipertahankan beberapa menit, kemudian sampel (pellet Kbr yang terbentuk) diambil dan kemudian ditempatkan pada sampel pan dan siap untuk dianalisis.

**X-Ray Diffraction (XRD)**

Tipe alat XRD yang digunakan adalah X'Pert PRO merk PANaliticalc MPD PW3040/60. Metode analisisnya berpedoman pada (Murillo-Morales et al., 2023). Tujuan analisis XRD untuk menentukan struktur kristal dan amorf pada sampel PUF. Sampel dikeringkan, setelah itu digiling sampai membentuk serbuk halus dengan ukuran < 10 μm. Serbuk dimasukkan ke holder sampel dan

padatkan sampai rata dan dilakukan analisis.

### Scanning Electron Microscope (SEM)

SEM yang digunakan pada penelitian ini bermerk Hitachi S-3400N. Metode analisisnya berpedoman pada Jiang et al. (2022). Ukuran diameter sel diukur dengan menggunakan program imageJ.

### Thermogravimetric Analysis (TGA)

Uji TGA menggunakan alat *thermal analyzer* DTG-60 merek Shimadzu. Metode analisisnya berpedoman pada Thangavelu et al. (2020). Alat dijalankan dengan laju aliran 50 mL/menit, laju pemanasan 10°C/menit, suhu pengukuran sampai 600 °C di bawah kondisi nitrogen. *Reference* ditimbang sebanyak 10 mg, kemudian sampel ditimbang sebanyak 10 mg. Setelah itu, dimasukkan ke dalam holder sampel berupa aluminium. Alat TGA dinyalakan dan sampel dimasukkan ke dalam alat. Alat dijalankan hingga sampel selesai dianalisis.

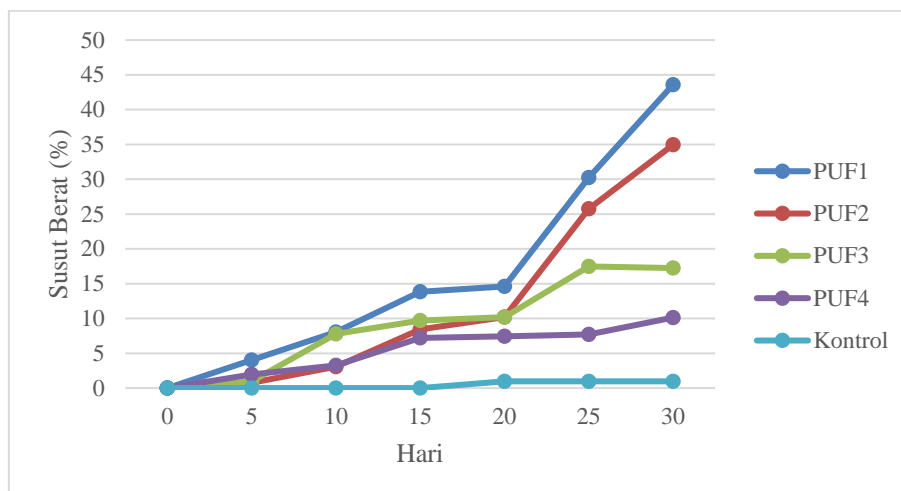
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis PUF ramah lingkungan dari polioliol minyak kelapa sawit yang dikombinasikan dengan PEG-400 dan

polioliol komersial telah dilakukan. Berdasarkan penelitian tersebut diperoleh PUF dengan sifat mekanik dan pengembangan busa yang mendekati karakteristik busa kontrol dari polioliol turunan minyak bumi. Pada penelitian ini dilakukan uji kemampuan biodegradasi PUF dan kontrol menggunakan air laut. Air laut dipilih karena mengandung berbagai jenis mikroorganisme alami yang menghasilkan enzim-enzim yang mampu mendegradasi PUF secara efektif.

### Susut Berat

Susunan struktural dan komposisi kimia polimer merupakan parameter penting yang menentukan pola degradasi (Naureen et al., 2021). Poliuretan terdiri dari segmen keras dan segmen lunak. Segmen keras terbentuk dari diisosiyanat dan *chain extender*, sedangkan segmen lunak terbentuk dari rantai polimer diol yang panjang dan alifatik. Segmen keras membentuk ikatan silang. Segmen lunak poliuretan mudah terurai karena memiliki ikatan yang mudah terhidrolisis seperti ikatan ester dan ikatan urea (ikatan amida) (Xu & Hong, 2022). Rasio segmen keras dan lunak mempengaruhi tingkat degradasi busa poliuretan fleksibel.



**Gambar 3.** Susut Berat Berbagai Sampel Busa Poliuretan Fleksibel dengan Media Degradasi Air Laut

Pengamatan pada hari ke-5 semua sampel membentuk endapan kecuali pada sampel busa yang disintesis dari polioli komersial 100%. Pada media air laut PUF terdegradasi menjadi oligomer dan kemudian menjadi pecahan-pecahan kecil berupa endapan yang akhirnya terurai menjadi air dan karbon dioksida (Ali et al., 2023).

Polioli minyak kelapa sawit merupakan polioli organik penyusun segmen lunak PUF. Segmen lunak poliuretan mudah terurai karena memiliki ikatan yang mudah terhidrolisis seperti ikatan ester dan ikatan urea (ikatan amida) (Xu & Hong, 2022). Gambar 3 menunjukkan bahwa PUF1 (44%) dan PUF2 (35%) memiliki kemampuan degradasi dalam air laut yang lebih baik dibanding PUF3 (17%), PUF4 (10%), dan kontrol (1%). Hal ini disebabkan karena PEG-400 bersifat hidrofilik yang dapat larut dalam air laut sehingga lebih mudah didegradasi oleh mikroba polimer (Asakura et al., 2021).

Polaritas PEG-400 yang tinggi akibat adanya gugus hidroksil dan gugus eter (Guo et al., 2023). Polioli komersial bersifat kurang larut pada air laut menyebabkan laju biodegradasi sangat lambat. Faktor-faktor yang mempengaruhi laju biodegradasi PUF dan kontrol adalah perbedaan rasio hidrofobik dan hidrofilik serta persentase fragmen berbasis bio (Chaudhuri & Karak, 2020). Penelitian ini telah membuktikan bahwa PUF yang disintesis dari polioli minyak kelapa sawit dan PEG-400 pada media air laut memiliki tingkat biodegradasi yang lebih baik melalui aktivitas enzim yang dilepaskan oleh berbagai mikroorganisme.

Ali et al. (2023) menyatakan bahwa mikroorganisme yang dapat mendegradasi polimer pada ekosistem air laut adalah *actinomycetes* dan bakteri yang menghasilkan enzim lipase. Bakteri pada air laut yang mampu mendegradasi

poliester poliuretan adalah *Pseudomonas chlororaphis*, *Bacillus subtilis*, *Comamonas acidovorans*, dan *Acinetobacter gernerii* (Kemona & Piotrowska, 2020). Kemona & Piotrowska (2020) juga menyatakan bahwa mikroorganisme bisa tumbuh pada material karena adanya sumber karbon dan nitrogen. Mekanisme proses biodegradasi oleh mikroorganisme berbeda-beda, seperti proses biodegradasi oleh jamur dilakukan melalui miselium yang menembus pori-pori material, sedangkan proses biodegradasi oleh bakteri dilakukan melalui pembentukan biofilm pada permukaan sampel.

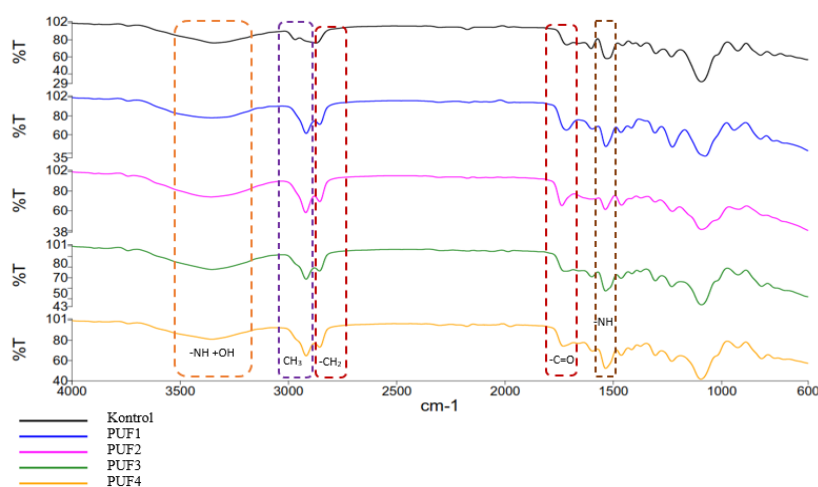
Tingkat biodegradasi PUF3, PUF4 dan kontrol pada media air laut lebih rendah dibandingkan dengan PUF1 dan PUF2. Hal ini berkaitan juga dengan kristalinitas polimer pada segmen keras dapat menghambat penyerapan air, sehingga proses biodegradasi hanya terjadi pada permukaan busa saja (Ali et al., 2023). Polioli komersial yang bersifat hidrofobik dan memiliki kristalinitas yang tinggi menyebabkan PUF3, PUF4, dan kontrol memiliki tingkat biodegradasi yang rendah pada air laut. Kontrol memiliki susut berat sangat rendah selama 30 hari biodegradasi karena ketersediaan sumber karbon dan mineral pada busa ini sangat terbatas sehingga aktifitas enzim menjadi rendah.

Sampel busa poliuretan fleksibel yang disintesis dari polioli kelapa sawit dengan PEG-400 (PUF1 dan PUF2) memiliki tingkat biodegradasi yang lebih tinggi dari penelitian Nilawar & Chatterjee, (2022) menyatakan bahwa film poliuretan yang disintesis dari polioli minyak zaitun 50%:PEG-600 50% yang dihidrolisis oleh enzim lipase selama 63 hari memiliki kehilangan berat sebesar 17,5%. Perbedaan derajat polimer mempengaruhi kemampuan biodegradasi materi.

PEG-400 merupakan segmen lunak berbentuk kristal yang lebih mudah terdegradasi dibanding polioliol komersial berbentuk kristal pada segmen keras. Segmen lunak lebih mudah terbiodegradasi dibanding segmen keras sehingga kandungan PEG-400 harus dikontrol untuk mengatur tingkat biodegradasi busa. Tingkat biodegradasi yang tinggi mengakibatkan dapat memperpendek umur busa (Ali et al., 2023).

### Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

FTIR yang digunakan adalah FTIR merk Perkin Elmer. Tujuan analisis FTIR adalah untuk mengetahui keberadaan gugus fungsional pada PUF1, PUF2, PUF3, PUF4, dan kontrol yang telah mengalami biodegradasi selama 30 hari. Gugus fungsional dapat mengidentifikasi keberadaan senyawa-senyawa dan ikatan-ikatan pada busa yang belum terurai.



**Gambar 4.** Spektrum FTIR berbagai Sampel Busa Poliuretan Fleksibel dengan Media Degradasi Air Laut Selama 30 Hari

Bilangan gelombang 3300 dan 3250  $\text{cm}^{-1}$  pada Gambar 4 menunjukkan adanya gugus imino (-NH) dan bilangan gelombang 1693  $\text{cm}^{-1}$  menandakan adanya karbonil (-C=O), kedua gugus ini terdapat pada ikatan uretan (Burelo et al., 2022). Peningkatan luas puncak alkohol/amina ini menunjukkan bahwa ikatan poliester telah dihidrolisis. Hasil analisis FTIR menunjukkan bahwa PUF1, PUF2, PUF3, dan PUF4 memiliki gugus amin (-NH) pada bilangan gelombang 3300-3250  $\text{cm}^{-1}$  dengan puncak serapan yang tidak tajam dan gugus karbonil (-C=O) pada bilangan gelombang 1693  $\text{cm}^{-1}$ , sedangkan kontrol memiliki puncak serapan yang lebih tajam. Sebagian ikatan uretan (-OCONH-) pada PUF1 > PUF2 > PUF3 > PUF4 telah

mengalami biodegradasi sehingga  $\text{CO}_2$  mudah terlepas dari sel busa. Kondisi ini menyebabkan hilangnya puncak serapan dengan bilangan gelombang 2355,07  $\text{cm}^{-1}$  ( $\text{CO}_2$ ). Menghilangnya puncak serapan gugus isosianat (-NCO) pada daerah sekitar 2250-2300  $\text{cm}^{-1}$  untuk semua sampel PUF akibat proses biodegradasi, sedangkan pada kontrol masih terdapat serapan puncak -NCO. Nilawar & Chatterjee (2022) menjelaskan bahwa intensitas puncak pada 3300-3400  $\text{cm}^{-1}$  dapat dikaitkan dengan gugus hidroksil bebas yang terbentuk sebagai hasil dari hidrolisis ikatan ester.

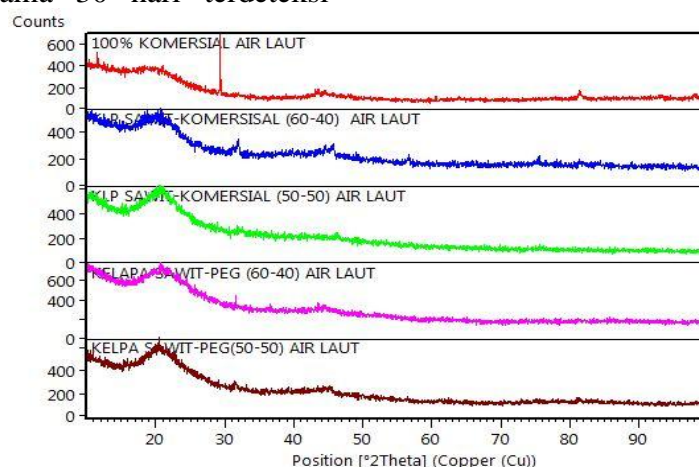
Semua sampel busa mempunyai gugus metilen (- $\text{CH}_2$ ) pada bilangan gelombang 2954-2853  $\text{cm}^{-1}$  (Burelo et al.,

2022). Intensitas puncak karbonil pada bilangan gelombang  $1735\text{ cm}^{-1}$  yang tidak tajam menunjukkan keberadaan gugus ester lebih rendah pada sampel yang terdegradasi. Peningkatan intensitas tekukan  $\text{-NH}$  bending pada gugus uretan pada bilangan gelombang  $1535\text{ cm}^{-1}$  diamati pada spektrum FTIR sampel yang terdegradasi. Pengamatan ini menemukan bahwa hidrolisis ikatan ester terjadi selama degradasi polimer ini. Burelo et al. (2022) mengungkapkan bahwa adanya enzim yang memiliki gen yang mengkode protein dengan hidrolitik (esterase, uretanase) dan aktivitas oksidatif (mono-, di-oksigenase, dehidrogenase) yang beraktivitas selama proses biodegradasi busa. Poliuretan yang terbentuk dari poliester mempunyai kemampuan biodegradabilitas yang lebih tinggi dibandingkan dari polieter (Chandure et al., 2014).

### X-Ray Diffraction (XRD)

Gambar 5 menunjukkan bahwa sampel busa poliuretan yang disintesis dari polioliol komersial 100% dengan media biodegradasi air laut memiliki puncak difraksi yang tajam pada nilai  $2\theta = 34,23^\circ$  (CO). Hal ini menunjukkan bahwa ikatan uretan pada kontrol yang direndam pada air laut selama 30 hari sebagian kecil terhidrolisis. PUF1 setelah mengalami biodegradasi selama 30 hari terdeteksi

puncak difraksi dengan nilai  $2\theta = 20,90^\circ$  (PEG-400) dan  $2\theta = 31,65^\circ$  (CO). PUF2 setelah mengalami biodegradasi selama 30 hari terlihat puncak difraksi dengan nilai  $2\theta = 18,84^\circ$  (PEG-400) dan  $2\theta = 45,23^\circ$  (CO). PUF3 setelah mengalami biodegradasi selama 30 hari terdeteksi puncak difraksi dengan nilai  $2\theta = 45,23^\circ$  (CO dan polioliol komersial). PUF4 setelah mengalami biodegradasi selama 30 hari terdeteksi puncak difraksi dengan nilai  $2\theta = 22,67^\circ$  (polioliol komersial) dan  $2\theta = 32,71^\circ$  (CO). Hal ini menunjukkan ikatan uretan pada PUF1, PUF2, PUF3, dan PUF4 selama 30 hari telah terhidrolisis sebagian, yang terlihat pada puncak-puncak difraksi yang tidak tajam. Polioliol minyak kelapa sawit telah mengalami biodegradasi, sedangkan PEG-400 dan polioliol komersial bersifat kristal membutuhkan waktu penguraian yang lebih lama. Kemona & Piotrowska (2020) menyatakan bahwa poliester jauh lebih rentan terhadap degradasi biologis dibandingkan polieter. Polioliol minyak kelapa sawit merupakan poliester lebih cepat terdegradasi secara biologis dibanding polieter (PEG-400 dan polioliol komersial). PEG-400 merupakan segmen lunak berbentuk kristal lebih lambat terdegradasi dibanding segmen lunak yang berbentuk amorf (Xu & Hong, 2022).



**Gambar 5.** Hasil Analisis XRD Berbagai Sampel Busa Poliuretan Fleksibel dengan Media Degradasi Air Laut Selama 30 Hari

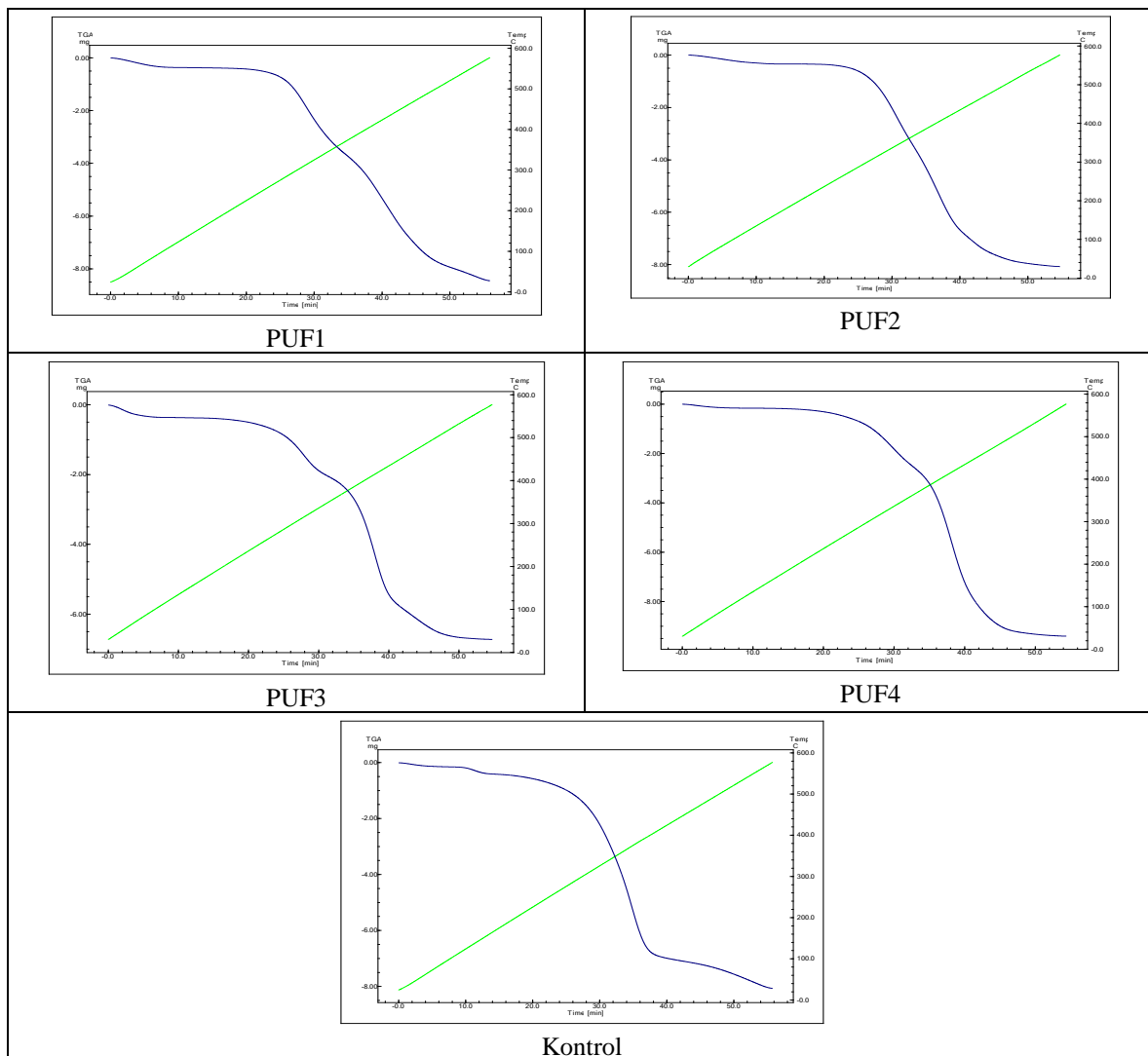


Kontrol memiliki puncak difraksi yang tajam yang menunjukkan keberadaan senyawa berbentuk kristal (poliuretan komersial). Hal ini menjelaskan bahwa ikatan uretan belum terdegradasi pada proses biodegradasi selama 30 hari.

### Thermogravimetric Analysis (TGA)

Analisis TGA pada PUF menunjukkan kestabilan sampel terhadap panas. Hasil analisis TGA setelah sampel dibiodegradasi selama 30 hari (Gambar 6) menunjukkan bahwa PUF1, PUF2, PUF4, dan kontrol mengalami 2 tahap kehilangan berat, sedangkan PUF3 mengalami 3 tahap

kehilangan berat. PUF1 mengalami kehilangan berat tahap 1 sebesar 3,55% pada suhu 110°C dan kehilangan berat tahap 2 sebesar 80,35% pada suhu 550°C. PUF2 mengalami kehilangan berat tahap 1 sebesar 3,20% pada suhu 140°C dan kehilangan berat tahap 2 sebesar 75,80% pada suhu 530°C. PUF4 mengalami kehilangan berat tahap 1 sebesar 1,78% pada suhu 180°C dan kehilangan berat tahap 2 sebesar 90,19% pada suhu 519°C. Kontrol mengalami kehilangan berat tahap 1 sebesar 4,02% pada suhu 160°C dan kehilangan berat tahap 2 sebesar 65,22% pada suhu 420°C.



**Gambar 6.** Hasil Analisis TGA Berbagai Sampel Busa Poliuretan Fleksibel dengan Media Degradasi Air Laut Selama 30 Hari

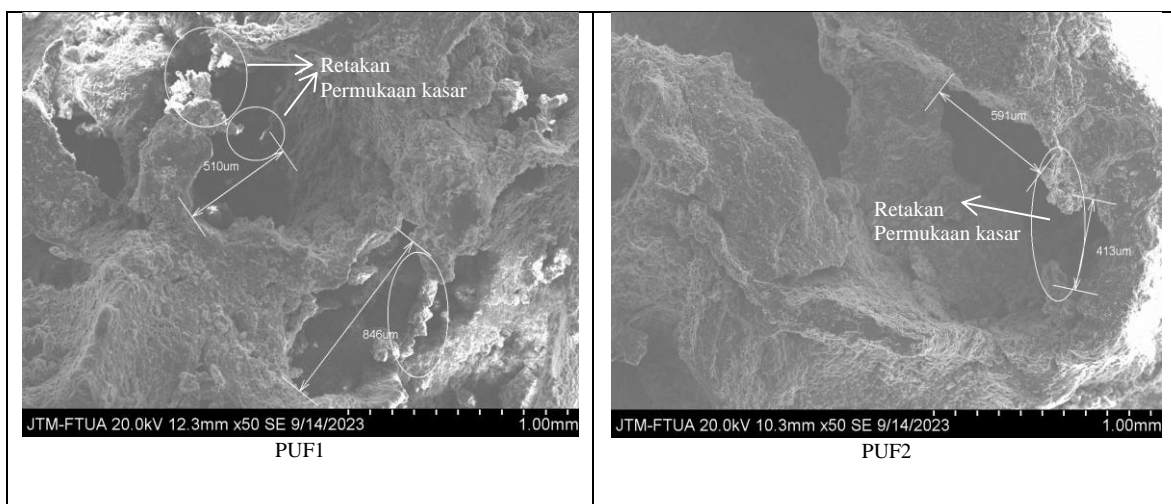
Segmen keras (ikatan uretan) lebih rentan terhadap panas dan terdegradasi terlebih dahulu (Kumar et al., 2022). Jia et al. (2022) menjelaskan bahwa kehilangan massa tahap pertama terjadi karena adanya degradasi segmen keras dan ikatan lemah dari O=C-NH yang mengarah pada pembentukan amina isosianat primer atau sekunder. Energi ikatan C-N lebih lemah dari C-O dan C-C, selain itu karena segmen keras memiliki berat molekul yang lebih rendah dibanding segmen lunak (Xu et al., 2020). Segmen rantai molekul dari poliuretan mulai terdegradasi, melepaskan isosianat, polioliol dan produk-produk intermediet pirolisis lainnya (Xu et al., 2020). Tahap 2 menyebabkan terjadinya kehilangan massa maksimum akibat terjadinya degradasi segmen lunak yang mengandung rantai polieter (PEG-400 dan polioliol komersial). Kandungan oksigen yang tinggi pada *soft* segmen (ikatan ester) menyebabkan terjadinya penyerapan panas yang besar (Kumar et al., 2022).

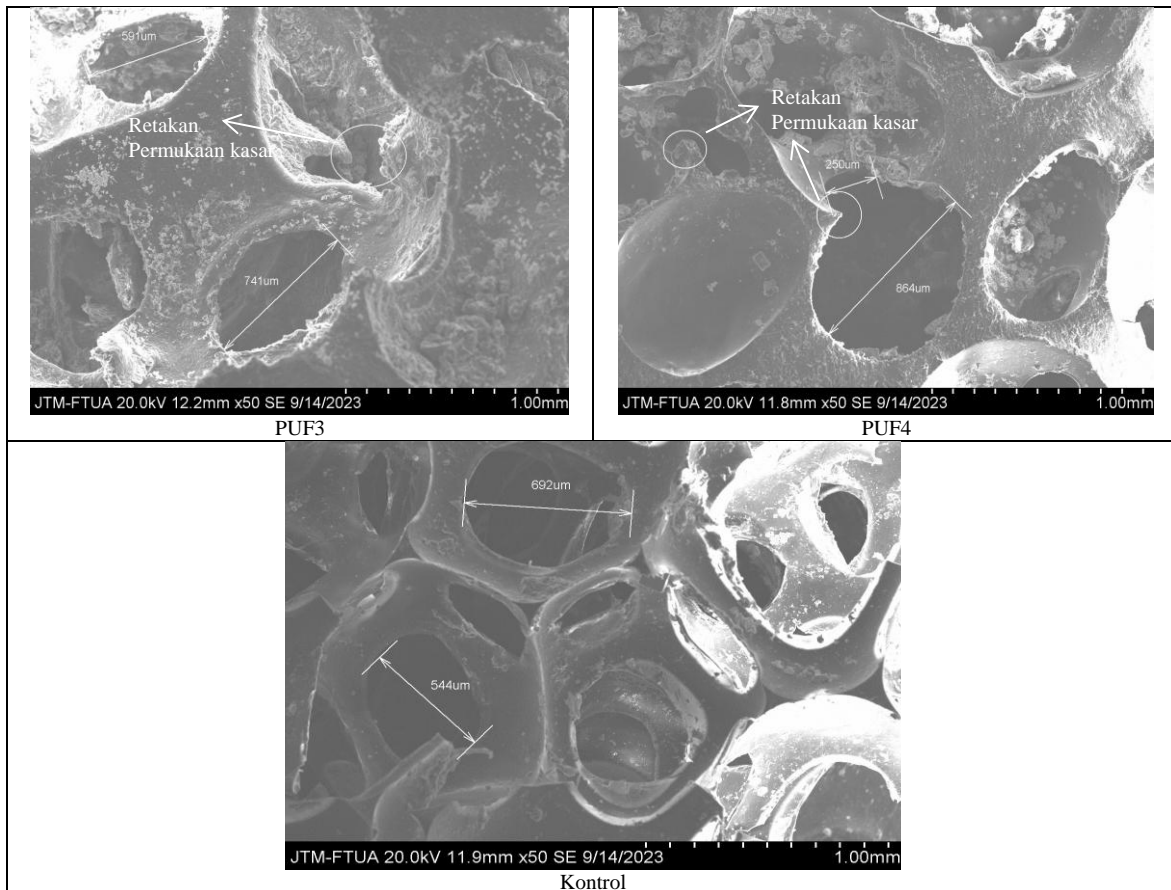
PUF 3 mengalami 3 tahap kehilangan berat, yaitu kehilangan berat tahap 1 sebesar 3,60% pada suhu 142°C, kehilangan berat tahap 2 sebesar 14,59%

pada suhu 338°C, dan kehilangan berat tahap 3 sebesar 47,74% pada suhu 420°C. Tahap pertama terjadi degradasi segmen keras, tahap kedua terjadi degradasi polioliol komersial, dan tahap ketiga terjadi degradasi ikatan silang polimer (Sultan et al., 2021).

### Scanning Electron Microscope (SEM)

Gambar 7 menunjukkan bahwa morfologi PUF1, PUF2, dan PUF3 yang disintesis dari polioliol minyak kelapa sawit yang dikombinasikan dengan PEG-400 dan polioliol komersial mengalami degradasi selama 30 hari dalam media air laut. Hal ini ditunjukkan adanya permukaan busa menjadi kasar dan kerangka sel yang patah sehingga terjadi peningkatan ukuran pori yang dapat mengakibatkan retaknya material. Burelo et al. (2022) menjelaskan bahwa biodegradasi busa poliuretan ditunjukkan oleh munculnya retakan, rongga, lubang dengan ukuran berbeda, dan ketidakteraturan pada permukaan busa. Busa poliuretan fleksibel yang disintesis dari polioliol minyak kelapa sawit lebih sensitif terhadap serangan mikroorganisme dibandingkan kontrol.





**Gambar 7.** Pengamatan SEM Berbagai Sampel Busa Poliuretan fleksibel dengan Media Degradasi Air Laut Selama 30 Hari

## KESIMPULAN

PUF1 memiliki komposisi polioli minyak kelapa sawit 60% dan PEG-400 40% lebih cepat mengalami biodegradasi selama 30 hari pada media air laut dengan susut berat sebesar 44%. Analisis FTIR menunjukkan ikatan ester mengalami biodegradasi. XRD mengidentifikasi kristalinitas PEG-400 pada PUF1 yang memerlukan waktu biodegradasi lebih lama daripada polioli minyak kelapa sawit. PEG-400 berperan dalam penyusunan segmen lunak, sedangkan polioli komersial pada PUF3, PUF4 terdapat pada segmen keras. Biodegradasi segmen keras lebih lama daripada segmen lunak. Hasil SEM menunjukkan bahwa PUF1, PUF2, PUF3, dan PUF4 telah mengalami proses biodegradasi, yang ditandai dengan munculnya retakan dan permukaan kasar pada struktur busa. Sementara itu,

morfologi sampel kontrol tidak menunjukkan perubahan secara signifikan. Penelitian ini berhasil membuktikan busa poliuretan fleksibel berbasis polioli minyak kelapa sawit memiliki kemampuan biodegradasi yang lebih cepat dibandingkan polioli dari turunan minyak bumi.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih terutama ditujukan kepada Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Andalas yang telah memberi dana penelitian melalui program DIPA dengan nomor kontrak: 01C/PL/PN-UNAND/FATETA-2023.

## DAFTAR PUSTAKA

Ali, A., Ul Amin, B., Yu, W., Gui, T., Cong, W., Zhang, K., Tong, Z.,

- Hu, J., Zhan, X., & Zhang, Q. (2023). Eco-Friendly Biodegradable Polyurethane Based Coating for Antibacterial and Antifouling Performance. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 54, 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2022.09.004>
- Asakura, T., Ibe, Y., Jono, T., & Naito, A. (2021). Structure and Dynamics of Biodegradable Polyurethane-Silk Fibroin Composite Materials in The Dry and Hydrated States Studied Using <sup>13</sup>C Solid-State NMR Spectroscopy. *Polymer Degradation and Stability*, 190, 109645. <https://doi.org/10.1016/j.j.2021.109645>
- Briassoulis, D., Pikasi, A., Papadaki, N. G., & Mistriotis, A. (2020). Aerobic Biodegradation of Bio-Based Plastics in The Seawater/Sediment Interface (Sublittoral) Marine Environment of the Coastal Zone – Test Method Under Controlled Laboratory Conditions. *Science of the Total Environment*, 722. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137748>
- Burelo, M., Gaytán, I., Loza-Tavera, H., Cruz-Morales, J. A., Zárate-Saldaña, D., Cruz-Gómez, M. J., & Gutiérrez, S. (2022). Synthesis, Characterization and Biodegradation Studies of Polyurethanes: Effect Of Unsaturation on Biodegradability. *Chemosphere*, 307(September 2021). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136136>
- Chandure, A. S., Bhusari, G. S., & Umare, S. S. (2014). Synthesis, Characterization and Biodegradation Studies of Poly(Ester-Urethane)s. *Emerging Materials Research*, 3(2), 91–100. <https://doi.org/10.1680/emr.13.00022>
- Chaudhuri, H., & Karak, N. (2020). Water Dispersed Bio-Derived Transparent Polyurethane: Synthesis, Properties Including Chemical Resistance, UV-Aging, and Biodegradability. *Progress in Organic Coatings*, 146(May), 105730. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105730>
- Choi, H. J., & Kim, J. H. (2020). Static and dynamic Comfort Properties Of Polyurethane Foams Including a Flexible Amine Crosslinker. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 90, 260–265. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.07.021>
- Contreras, J., Valdés, O., Mirabal-Gallardo, Y., de la Torre, A. F., Navarrete, J., Lisperguer, J., Durán-Lara, E. F., Santos, L. S., Nachtigall, F. M., Cabrera-Barjas, G., & Abril, D. (2020). Development of Eco-Friendly Polyurethane Foams Based on *Lesquerella fendleri* (A. Grey) Oil-Based Polyol. *European Polymer Journal*, 128(January), 109606. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109606>
- De Souza, F. M., Kahol, P. K., & Gupta, R. K. (2021). Introduction to Polyurethane Chemistry [Chapter]. *ACS Symposium Series*, 1380, 1–24. <https://doi.org/10.1021/bk-2021-1380.ch001>
- Dimassi, S. N., Hahladakis, J. N., Chamkha, M., Ahmad, M. I., Al-Ghouti, M. A., & Sayadi, S. (2024). Investigation on The Effect of Several Parameters Involved in The Biodegradation of Polyethylene (PE) and Low-Density Polyethylene (LDPE) Under Various Seawater Environments.

*Science of the Total Environment*, 912(November 2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168870>

- Firdaus, F. E. (2014). Synthesis and Characterization of Soy-Based Polyurethane Foam with Utilization of Ethylene Glycol in Polyol. *Makara Journal of Technology*, 18(1), 11–16. <https://doi.org/10.7454/mst.v18i1.338>
- Guo, Y., An, X., & Qian, X. (2023). Biodegradable and Reprocessable Cellulose-Based Polyurethane Films for Bonding and Heat Dissipation in Transparent Electronic Devices. *Industrial Crops and Products*, 193 (December 2022), 116247. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116247>
- Jia, P., Ma, C., Lu, J., Yang, W., Jiang, X., Jiang, G., Yin, Z., Qiu, Y., Qian, L., Yu, X., Hu, Y., Hu, W., & Wang, B. (2022). Design of Copper salt@graphene Nanohybrids to Accomplish Excellent Resilience and Superior Fire Safety For Flexible Polyurethane Foam. *Journal of Colloid and Interface Science*, 606, 1205–1218. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.08.139>
- Jiang, Q., Li, P., Liu, Y., & Zhu, P. (2022). Green Flame-Retardant Flexible Polyurethane Foam Based on Polyphenol-Iron-Phytic Acid Network To Improve The Fire Safety. *Composites Part B: Engineering*, 239(March), 109958. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109958>
- Kemona, A., & Piotrowska, M. (2020). Polyurethane Recycling and Disposal: Methods and Prospects. *Polymers*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/polym12081752>
- Kumar, S., Prakash, R., & Maiti, P. (2022). Redox Mediation Through Integrating Chain Extenders in Active Ionomer Polyurethane Hard Segments in CdS Quantum Dot Sensitized Solar Cell. *Solar Energy*, 231(August 2021), 985–1001. <https://doi.org/10.1016/j.soler.2021.12.043>
- Lim, W. Bin, Min, J. G., Seo, M. J., Lee, J. H., Bae, J. H., & Huh, P. H. (2023). Synthesis and Properties of Biodegradable Waterborne Polyurethane Modified as Castor Oil. *Results in Materials*, 19(May), 100433. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2023.100433>
- Murillo-Morales, G., Sethupathy, S., Zhang, M., Xu, L., Ghaznavi, A., Xu, J., Yang, B., Sun, J., & Zhu, D. (2023). Characterization and 3D Printing of a Biodegradable Polylactic Acid/Thermoplastic Polyurethane Blend With Laccase-Modified Lignin as a Nucleating Agent. *International Journal of Biological Macromolecules*, 236 (December 2022), 123881. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123881>
- Nabipour, H., Wang, X., Song, L., & Hu, Y. (2020). A Fully Bio-Based Coating Made From Alginate, Chitosan and Hydroxyapatite for Protecting Flexible Polyurethane Foam From Fire. *Carbohydrate Polymers*, 246(May), 116641. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116641>
- Naureen, B., Haseeb, A. S. M. A., Basirun, W. J., & Muhamad, F. (2021). Synthesis and Degradation of 3D Biodegradable Polyurethane Foam Scaffolds Based on Poly

- (Propylene Fumarate) and Poly [(R)-3-hydroxybutyrate]. *Materials Today Communications*, 28(April), 102536. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102536>
- Neswati, Nazir, N., Arief, S., & Yusniwati. (2023). Improvement of Flexible Polyurethane Foam Characteristics of Palm Oil Polyols with the Addition of Polyethylene Glycol-400. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1228(1), 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1228/1/012031>
- Nilawar, S., & Chatterjee, K. (2022). Olive Oil-Derived Degradable Polyurethanes for Bone Tissue Regeneration. *Industrial Crops and Products*, 185(May), 115136. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115136>
- Peyrton, J., & Avérous, L. (2021). Structure-Properties Relationships of Cellular Materials From Biobased Polyurethane Foams. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 145(February). <https://doi.org/10.1016/j.mser.2021.100608>
- Pradana, H., & Galib, M. (2021). Mapping Marine Debris in Coastal Area Padang City. *Asian Journal of Aquatic Sciences*, 4(3), 221–224.
- Prociak, A., Malewska, E., Kurańska, M., Bąk, S., & Budny, P. (2018). Flexible Polyurethane Foams Synthesized With Palm Oil-Based Bio-Polyols Obtained With The Use of Different Oxirane Ring Opener. *Industrial Crops and Products*, 115(May 2017), 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.008>
- Rao, W. H., Liao, W., Wang, H., Zhao, H. B., & Wang, Y. Z. (2018). Flame-Retardant and Smoke-Suppressant Flexible Polyurethane Foams Based on Reactive Phosphorus-Containing Polyol and Expandable Graphite. *Journal of Hazardous Materials*, 360(March), 651–660. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.08.053>
- Sultan, M., Jamal, Z., Jubeen, F., Farooq, A., Bibi, I., Uroos, M., Chaudhry, H., Alissa, S. A., & Iqbal, M. (2021). Green Synthesis of Biodegradable Polyurethane And Castor Oil-Based Composite For Benign Transformation of Methylene Blue. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(12), 103417. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103417>
- Thangavelu, S. A. G., Mukherjee, M., Layana, K., Dinesh Kumar, C., Sulthana, Y. R., Rohith Kumar, R., Ananthan, A., Muthulakshmi, V., & Mandal, A. B. (2020). Biodegradable Polyurethanes Foam and Foam Fullerenes Nanocomposite Strips By One-Shot Moulding: Physicochemical and Mechanical properties. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 112(April 2019), 105018. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105018>
- Uram, K., Prociak, A., Vevere, L., Pomilovskis, R., Cabulis, U., & Kirpluks, M. (2021). Natural Oil-Based Rigid Polyurethane Foam Thermal Insulation Applicable At Cryogenic Temperatures. *Polymers*, 13(24). <https://doi.org/10.3390/polym13244276>
- Xu, C., & Hong, Y. (2022a). Rational Design of Biodegradable Thermoplastic Polyurethanes For

Tissue Repair. *Bioactive Materials*, 15(June 2021), 250–271. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2021.11.029>

Xu, C., & Hong, Y. (2022b). Rational Design of Biodegradable Thermoplastic Polyurethanes For Tissue Repair. *Bioactive Materials*, 15(November 2021), 250–271. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2021.11.029>

Xu, W., Chen, R., Du, Y., & Wang, G. (2020). Design Water-Soluble Phenolic/Zeolitic Imidazolate Framework-67 Flame Retardant Coating Via Layer-by-Layer Assembly Technology: Enhanced Flame Retardancy and Smoke Suppression of Flexible Polyurethane Foam. *Polymer Degradation and Stability*, 176, 109152. <https://doi.org/10.1016/j.polydegradstab.2020.109152>