

DEPOLIMERISASI LIMBAH POLIETILEN TEREFTALAT (PET) MENJADI ASAM TEREFTALAT (SUMBER LINKER MOF-5) DENGAN METODE HIDROLISIS ASAM BASA

DEPOLYMERIZATION OF POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET) WASTE TO TEREPHTHALIC ACID (LINKER SOURCE MOF-5) BY ACID-BASE HYDROLYSIS METHOD

Arsy Aprilia Mid, Husna Syaima*, Noor Hindryawati

Department of Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Mulawarman University, Gunung Kelua Campus, Samarinda 75123 Indonesia

*Corresponding Author: husna.syaima@fmipa.unmul.ac.id

Diterbitkan: 31 Oktober 2024

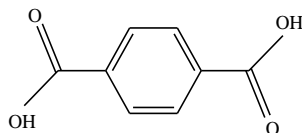
ABSTRACT

Terephthalic acid is an important ligand in the manufacture of MOF-5 which has been obtained from the depolymerization of PET (polyethylene terephthalate) recycled from PET plastic waste. Depolymerization of PET polymers into terephthalic acid ligands (linkers) is carried out using the acid-base hydrolysis method at room temperature using H_2SO_4 and NaOH. The yield was obtained at 40.95% (8.19 grams). PET monomers in the form of terephthalic acid were then tested by Thin Layer Chromatography (TLC) using n-hexane and ethyl acetate solvents (1:2). The TLC results showed the same stain spot between depolymerized terephthalic acid and commercial terephthalic acid. Depolymerized terephthalic acid and commercial terephthalic acid were then analyzed using *Fourier Transform Infrared* (FTIR) which showed the presence of functional groups C=O, C-O, C-H, and O-H and analyzed with a UV-Visible Spectrophotometer and obtained a maximum wavelength in both materials of 306 nm.

Keywords: *Terephthalic Acid, depolymerization, polyethylene terephthalate*

PENDAHULUAN

Asam tereftalat (TPA) atau 1,4-*benzene dicarboxyl acid* (BDC) merupakan senyawa kimia yang biasanya digunakan dalam industri kimia dan plastik. Senyawa ini tidak larut dalam air, tetapi dapat larut dalam pelarut organik seperti aseton atau etil asetat [1]. Asam tereftalat mampu membentuk kerangka yang sangat berpori dan terbuka sehingga sangat memungkinkan sebagai ligan atau jaringan ikat antara ion logam atau MOF (*Metal-Organic Framework*) salah satunya ialah MOF-5, [2]. Salah satu cara memperoleh asam tereftalat adalah dengan menggunakan limbah plastik PET yang telah didepolimerisasi. Adapun struktur dari asam tereftalat atau 1,4-*benzene dicarboxyl acid* (BDC) adalah sebagai berikut:



Gambar 2.1 Asam Tereftalat (TPA) [3].

Sampah plastik adalah masalah yang sangat mendesak untuk diatasi karena telah menjadi isu global [4]. Bahan sampah plastik yang paling sering dijumpai adalah plastik polietilena tereftalat (PET) yang terbuat dari reaksi kondensasi asam tereftalat (TPA) dan etilen glikol (EG). Bahan plastik polietilena tereftalat dapat ditemukan pada botol air dan minuman ringan. Secara global, peningkatan produksi plastik PET mengalami peningkatan sebesar 36 juta atau setara dengan 68 miliar botol pada 2019 [5]. Mengatasi hal tersebut, pentingnya prinsip *reduce, reuse dan recycle* (3R) diterapkan dalam pengelolaan dan menangani sampah plastik PET [4]. Metode kimia daur ulang plastik PET merupakan solusi terbaik dalam menghilangkan penimbunan

This is an open-access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



limbah PET sehingga lingkungan menjadi bersih dan nyaman untuk dihuni [5]. Selain itu, metode ini sangat ramah lingkungan, ekonomis serta mampu mengurangi penggunaan asam tereftalat (TPA) mentah kelas reagen baru [6]. Data ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Farahani & Zolgharnein (2022), yang menemukan bahwa depolimerisasi PET dilakukan dengan suhu ruang dan menggunakan asam basa sehingga asam tereftalat (1, 4-*benzene dicarboxylic acid* atau BDC) dalam limbah PET menjadi 85% [1].

Polyethylene terephthalate (PET) merupakan suatu jenis bahan plastik yang sering digunakan dalam produksi botol minuman, serat sintesis serta barang plastik lainnya [3]. Selama proses dipolimerisasi, dua komponen kimia yaitu asam tereftalat dan etilen glikol (EG) dipisahkan dari polietilen tereftalat (PET). PET adalah plastik yang paling banyak di daur ulang dengan tingkat daur ulang sebesar 60% hingga 90% [7]. Ketika proses daur ulang berlangsung ditemukan bahan kimia aromatik yang dapat mencegah kerusakan mikroba daur ulang kimia, *upcycling* dan *downcycling* sehingga proses daur ulang ini cocok untuk menjadi di solusi dalam menangani sampah plastik.

Proses depolimerisasi PET dengan asam dapat mereduksi PET menjadi monomer-monomernya yaitu asam tereftalat dan etilen glikol (EG). Metode ini digunakan bertujuan untuk mendaur ulang PET bekas dari botol plastik menjadi bahan baku PET yang baru [8]. Produk asam tereftalat dan etilen glikol yang dihasilkan oleh depolimerisasi PET dapat digunakan kembali sebagai bahan baku untuk menghasilkan plastik PET baru atau serat sintesis untuk pakaian [9]. Asam tereftalat (TPA) merupakan senyawa kimia yang berfungsi untuk industri plastik dan kimia. Rumus molekul dari TPA adalah $C_8H_6O_4$ yang memiliki dua gugus asam karboksilat (-COOH) yang terletak pada ujung rantai karbon aromatik. Pentingnya depolimerisasi PET yaitu untuk mengurangi limbah plastik dengan memanfaatkan sumber daya yang lebih hemat sehingga kelestarian lingkungan dan limbah plastik dapat berkurang dan strategi ini cocok untuk dilakukan [10].

Proses depolimerisasi PET dapat dilakukan dengan metode hidrolisis. Hidrolisis adalah metode yang bergantung pada kondisi pelarut air, suhu, tekanan dan katalis untuk mendapatkan monomer atau oligomer yang diinginkan. Hidrolisis PET dilakukan dengan katalisis asam, logam alkali dan suasana netral [11]. Metode ini sangat banyak digunakan pada penelitian karena dalam pelaksanaannya tidak membutuhkan suhu yang besar sehingga biaya produksinya juga murah. Metode ini cukup sederhana namun sangat efisien hasilnya karena output yang dihasilkan bisa digunakan kembali pada pembentukan PET [12].

METODOLOGI PENELITIAN

Alat-alat

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah pipet tetes, pipet volume, *bulp*, gelas *beaker*, gelas ukur, labu *Erlenmeyer*, neraca analitik, kaca arloji, spatula, batang pengaduk, corong kaca, botol reagen, botol vial, cawan petri, dan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) *Bruker Alpha II*

Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini ialah kertas saring *Whatman No.1*, *plastic wrap*, tisu, akuades. pH universal, botol plastik, $H_2SO_{4(p)}$, NaOH, n-Heksana, etil asetat, dan asam tereftalat.

Prosedur Penelitian

Preparasi Limbah Plastik PET

Sebelum PET didepolimerisasi, botol plastik merek "*Le Minerale*" dibersihkan dengan cara dicuci dengan air mengalir. Selanjutnya, botol plastik tersebut dipotong-potong dengan ukuran sekitar 5 mm x 5 mm.

Depolimerisasi PET

Potongan plastik PET sebanyak 20 gram ditambahkan dengan 50 mL H_2SO_4 96% dan diaduk selama 40 menit. Selanjutnya ditambahkan 40 ml akuades dengan suhu 8°C sehingga terbentuk endapan dan disaring. Saat endapan, ditambahkan 300 mL akuades dan padatan NaOH sedikit demi sedikit hingga pH-nya mencapai 11 lalu disaring. Untuk proses filtratnya ditambahkan H_2SO_4 98% hingga pH 1 dan terbentuknya endapan putih. Setelah plastik dari proses tersebut, dilakukan pencucian dengan akuades hingga pH-nya 6-7 dengan cara disaring dan dikeringkan pada suhu

105°C selama 2 jam. Hasil dari proses depolimerisasi dihitung dan dikonfirmasi menggunakan KLT dan dikarakterisasi dengan FTIR dan *UV-Visible*.

Uji Kromatografi Lapis Tipis (KLT)

Uji KLT terhadap asam tereftalat komersial dan hasil depolimerisasi PET bertujuan untuk mengetahui dan membandingkan spot noda yang dihasilkan dari kedua material.

Karakterisasi *Fourier Transform Infrared* (FTIR)

Karakterisasi terhadap asam tereftalat komersial dan hasil depolimerisasi PET menggunakan instrumen *Fourier Transform Infrared* (FTIR) bertujuan untuk mengetahui gugus fungsi yang ada pada material yang telah terbentuk.

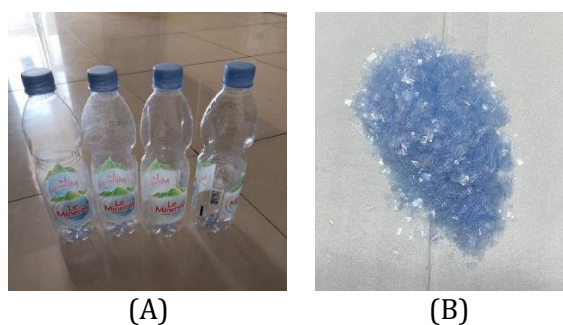
Karakterisasi Spektrofotometer *UV-Visible*

Karakterisasi terhadap asam tereftalat komersial dan hasil depolimerisasi PET menggunakan instrumen spektrofotometer *UV-Visible* bertujuan untuk mengetahui serapan panjang gelombang maksimum.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Preparasi Sampel PET

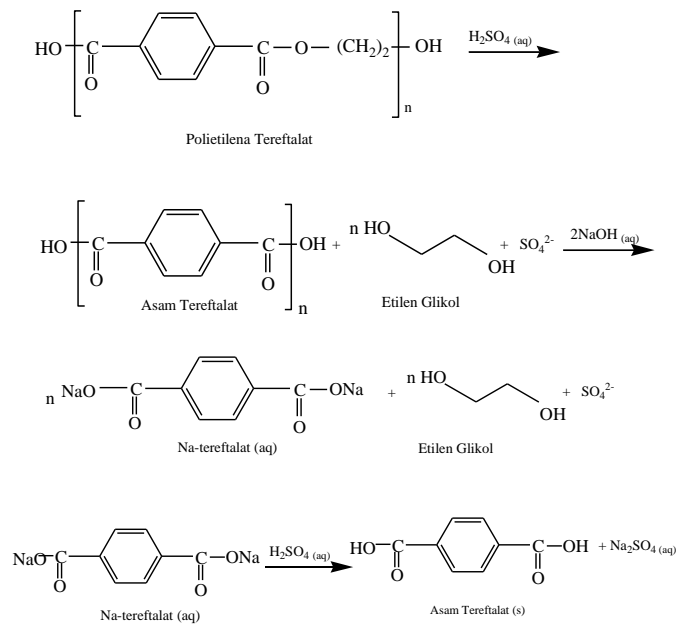
Sampel PET yang digunakan adalah limbah botol plastik bekas air minum merek "*Le Minerale*" yang telah dicuci bersih dan dipotong dengan ukuran sekitar 5 mm x 5 mm seperti pada **Gambar 1**.



Gambar 1. A) Botol bekas air mineral merek "*Le Minerale*" B) Serpihan PET yang siap digunakan

Depolimerisasi PET

Proses depolimerisasi PET dari limbah botol plastik merek "*Le Minerale*" merupakan penelitian dalam pembuatan asam tereftalat (TPA) dengan menggunakan cara hidrolisis asam-basa. Potongan PET yang telah ditambahkan $H_2SO_4(p)$ akan melepaskan ikatan ester telah membentuk asam tereftalat dan etilen glikol yang masih dalam bentuk larutan asam. Agar dapat memisahkan asam tereftalat dan etilen glikon dilakukan pengendapan dengan cara menambahkan akuades dingin. Setelah itu, ditambahkan NaOH hingga pH larutan mencapai 11 yang tujuannya agar asam tereftalat larut dalam suasana basa dan bereaksi membentuk Na-tereftalat dalam bentuk larutan yang kemudian Na-tereftalat tersebut dipisahkan dengan etilen glikol dengan cara disaring. Selanjutnya, filtrat yang berupa Na-tereftalat kemudian direaksikan kembali dengan $H_2SO_4(p)$ hingga pH 1 sehingga Na pada Na-tereftalat akan berikatan dengan SO_4 menjadi Na_2SO_4 dan H^+ akan berikatan dengan tereftalat membentuk asam tereftalat seperti pada mekanisme reaksi pada **Gambar 2**. Hasil yang diperoleh berupa padatan berwarna putih dan rendemen sebesar 40,95% (8,19 gram).

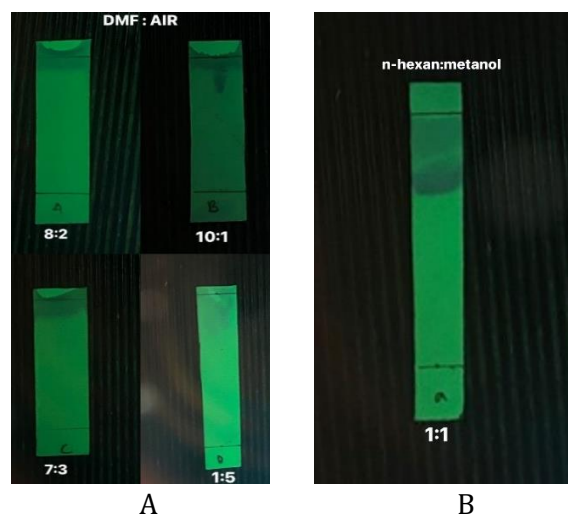


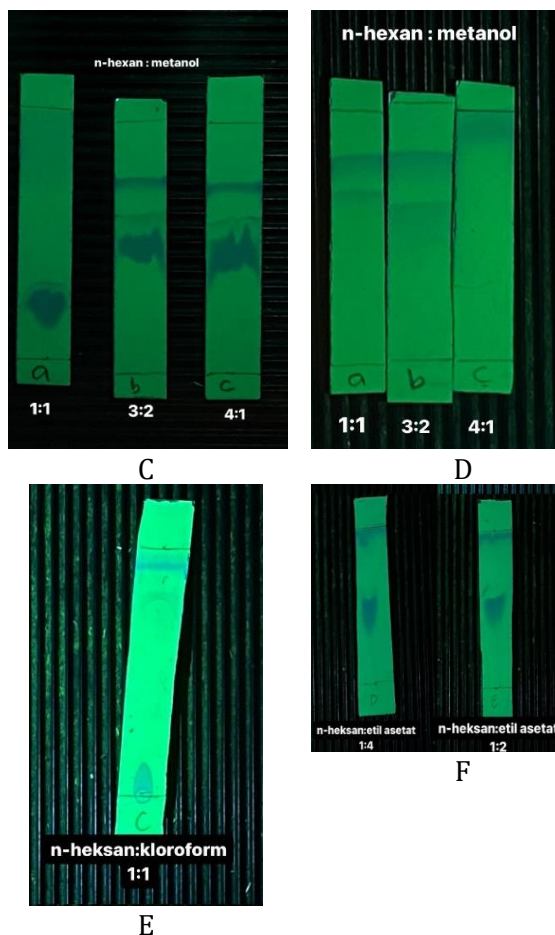
Gambar 2. Mekanisme Reaksi Depolimerisasi PET (Biermann et al, 2021).

Karakterisasi Hasil Depolimerisasi PET

a. Kromatografi Lapis Tipis (KLT)

Sebelum pengujian KLT, dilakukan percobaan untuk mencari kombinasi pelarut yang sesuai. Pelarut yang dipilih harus bersifat polar agar sesuai dengan senyawa yang ada pada asam tereftalat sehingga didapatkan hasil pemisahan yang baik [13]. Eluen yang baik adalah senyawa nonpolar yang mudah menguap karena mudah dibawa oleh fase gerak yang polaritasnya sama. Eluen ini harus mudah menguap agar sampel dapat dipisahkan dengan baik karna gaya dorong eluen yang cukup [14]. Kombinasi pelarut yang digunakan dalam penelitian ini adalah pelarut DMF-air, n-heksana-metanol, n-heksana-klorofom, dan n-heksana-etil asetat. Berikut hasil pengujian KLT pada **Gambar 3** dan **Tabel 1**. Berdasarkan percobaan yang dilakukan, maka digunakan kombinasi pelarut n-heksana:etil asetat dengan perbandingan 1:2 karena *spot* noda yang dihasilkan bagus dibanding hasil dari pelarut lain.





Gambar 3. A)DMF:air ; B) pengulangan 1 n-heksana: metanol ; C) pengulangan 2 n-heksana:metanol ; D) pengulangan 3 n-heksana:metanol ; E) n-heksana:kloroform ; F) n-heksana:etil asetat

Tabel 1. hasil uji KLT beberapa kombinasi pelarut

Dimetil formamida (DMF):air

- a. 8:2 Noda terbawa terlalu atas
- b. 10:1 Noda terbawa terlalu atas
- c. 7:3 Noda terbawa terlalu atas
- d. 1:5 Noda terbawa terlalu atas

n-heksana:methanol (pengulangan 1)

- a. 1:1 Noda dekat garis atas

n-heksana:methanol (pengulangan 2)

- a. 1:1 - lokasi noda berbeda dengan pengulangan 1
- Elusi mencapai garis atas
- b. 3:2 - Diperoleh lokasi noda yang bagus
- Elusi turun kebawah sebelum mencapai garis atas
- c. 4:1 - Diperoleh lokasi noda yang bagus
- Elusi turun kebawah sebelum mencapai garis atas

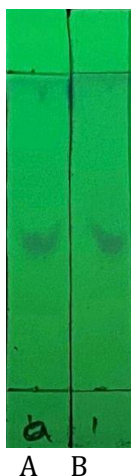
n-heksana:methanol (pengulangan 3)

- a. 1:1 - Diperoleh lokasi noda yang sama dengan pengulangan 1
- Elusi turun kebawah sebelum mencapai garis atas
- b. 3:2 - Diperoleh lokasi noda yang bagus
- Elusi turun kebawah sebelum mencapai garis atas
- c. 4:1 - Tidak diperoleh noda
- Elusi mencapai garis atas

n-heksana:kloroform

- a. 1:1 Elusi turun ke bawah sebelum mencapai garis atas
n-heksana:etil asetat
a. 1:4 Posisi noda baik, namun terlalu tebal
b. 1:2 Posisi noda baik, namun terlalu tebal

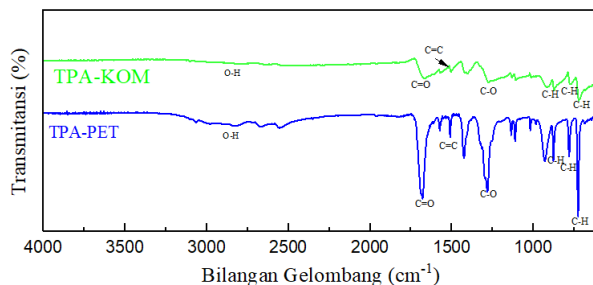
Hasil depolimerisasi PET kemudian di uji dengan Kromatografi Lapis Tipis (KLT) yang bertujuan untuk memastikan material yang diperoleh adalah benar merupakan TPA. Uji KLT dilakukan dengan menggunakan pelarut n-heksana dan etil asetat dengan perbandingan 1:2. Kombinasi n-heksana yang bersifat lebih nonpolar dan etil asetat yang bersifat lebih polar (tetapi masih merupakan pelarut nonpolar jika dibandingkan dengan pelarut polar seperti air atau etanol) digunakan untuk menghasilkan pelarut dengan tingkat polaritas yang di antara keduanya. Pada uji KLT *spot* noda yang dihasilkan pada TPA hasil depolimerisasi dibandingkan dengan *spot* noda dari TPA komersial. Hasil uji KLT menggunakan pelarut n-heksana dengan etil asetat dapat dilihat pada **Gambar 4** diperoleh *spot* noda yang sama persis antara keduanya.



Gambar 4. Hasil uji KLT A) TPA komersial; B) TPA depolimerisasi

b. *Fourier Transform Infrared (FTIR)*

FTIR) adalah salah satu alat untuk identifikasi struktur molekul secara simultan dan kuantitatif FTIR melepaskan puncak dan spektrum yang dapat bertindak sebagai sidik jari dari struktur molekul tertentu dan ikatan kimia [15]. Pada penelitian ini dilakukan uji karakterisasi menggunakan alat *Fourier Transform Infrared (FTIR)* terhadap asam tereftalat hasil depolimerisasi (TPA-PET) dan asam tereftalat komersial (TPA-KOM) yang berfungsi untuk mengidentifikasi gugus fungsi kimia yang ada dalam material tersebut dengan bilangan gelombang yang sesuai dan untuk memastikan bahwa monomer yang terbentuk merupakan asam tereftalat yakni dengan membandingkan spektra FTIR asam tereftalat hasil depolimerisasi dengan asam tereftalat komersial. Hasil Analisa FTIR dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Hasil spektrum FTIR asam tereftalat

Berdasarkan hasil spektrum FTIR terdapat puncak-puncak yang menunjukkan ciri khas asam tereftalat. Puncak khas tersebut menunjukkan cincin aromatik pada bilangan gelombang ~800-700

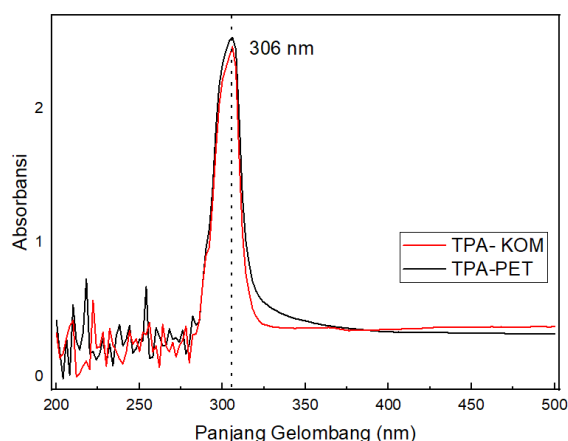
cm^{-1} yang menunjukkan C-H vibrasi tekuk (*bend*) aromatik pada posisi para. Terdapat serapan pada bilangan gelombang $\sim 1500 \text{ cm}^{-1}$ pada kedua material yang menunjukkan adanya gugus fungsi C=C dan cincin benzen pada asam tereftalat [16]. Selain itu, Terdapat bilangan gelombang 1680 cm^{-1} pada TPA-PET dan 1667 cm^{-1} pada TPA-KOM menunjukkan gugus fungsi C=O vibrasi ulur dari asam karboksilat. Puncak lain menunjukkan gugus karboksilat pada bilangan gelombang 1276 dan 1282 cm^{-1} yang menunjukkan ciri ikatan C-O vibrasi ulur (*stretch*) [17]. Juga terdapat serapan pada bilangan gelombang $3000\text{-}2500 \text{ cm}^{-1}$ yang menandakan adanya peregangan gugus O-H pada asam tereftalat [18]. Adapun tabel gugus fungsi dan bilangan gelombang dapat dilihat pada **Tabel 2**. Dapat dipastikan material hasil depolimerisasi adalah benar monomer asam tereftalat yang mana hal ini juga didukung oleh hasil uji KLT yang diperoleh.

Tabel 2. Hasil Karakterisasi FTIR TPA-PET dan TPA-KOM

Gugus Fungsi	Bilangan Gelombang (cm^{-1})	
	TPA-KOM	TPA-PET
O-H	3000-2500	3000-2500
C=O	1667	1680
C-O	1276	1282
C=C	1505	1510
C-H aromatik	875;775;723	879;783;728

c. Spektrofotometer *UV-Visible*

Spektrofotometer *UV-Visible* merupakan alat instrumen analisis yang memanfaatkan sumber radiasi elektromagnetik ultraviolet ($190\text{-}380 \text{ nm}$) dan sinar tampak atau *visible* ($380\text{-}700 \text{ nm}$) menggunakan perangkat spektrofotometer *UV-Vis* [19]. Ikatan pi pada asam tereftalat memungkinkan molekul ini menyerap cahaya dalam rentang *UV-Visible*. Ketika molekul tersebut tereksitasi oleh energi cahaya yang sesuai dengan panjang gelombang tertentu, energi ini dapat merangsang perpindahan elektron dalam ikatan pi, yang tercermin dalam spektrum absorpsi *UV-Visible*. Hasil uji asam tereftalat menggambarkan perbandingan antara spektrum *UV-Vis* dari asam tereftalat komersial (TPA-KOM) dan asam tereftalat hasil depolimerisasi (TPA-PET) yang menunjukkan penyerapan karakteristik pada 306 nm yang sesuai dengan transisi elektronik $\pi \rightarrow \pi^*$ dari domain C=C terkonjugasi dari cincin aromatik [20].



Gambar 5. Hasil spektrum *UV-Visible* asam tereftalat

KESIMPULAN

Monomer asam tereftalat berupa padatan berwarna putih berhasil dibuat menggunakan metode depolimerisasi asam-basa dengan hasil rendemen sebesar $40,95\%$ ($8,19 \text{ gram}$). Pada uji KLT digunakan kombinasi pelarut n-heksana:etil asetat ($1:2$) dan diperoleh *spot* noda asam tereftalat hasil depolimerisasi yang sama persis dengan *spot* noda asam tereftalat komersial serta diperoleh gugus

fungsi yang sesuai dengan gugus fungsi asam tereftalat seharusnya berdasarkan uji FTIR. Serta, diperoleh panjang gelombang maksimum pada TPA-KOM dan TPA-PET sebesar 306 nm.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dermanaki Farahani, S., & Zolgharnein, J. (2022). Removal of Alizarin red S by calcium-terephthalate MOF synthesized from recycled PET-waste using Box-Behnken and Taguchi designs optimization approaches. *Journal of Solid State Chemistry*, 316. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2022.123560>
- [2] Mirsoleimani-Azizi, S. M., Setoodeh, P., Zeinali, S., & Rahimpour, M. R. (2018). Tetracycline antibiotic removal from aqueous solutions by MOF-5: Adsorption isotherm, kinetic and thermodynamic studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(5), 6118–6130. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.09.017>
- [3] Iturrondobeitia, M., Alonso, L., & Lizundia, E. (2023). Prospective life cycle assessment of poly (ethylene terephthalate) upcycling via chemoselective depolymerization. *Resources, Conservation and Recycling*, 198, 107182. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107182>
- [4] Awaja, F., & Pavel, D. (2005). Recycling of PET. In *European Polymer Journal* (Vol. 41, Issue 7, pp. 1453–1477). <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005>
- [5] Al-Busafi, S. (2021). Green Preparation of Aluminum-based Metal-organic Framework (Al-MOF) from Waste Plastic Bottles and Waste Aluminum Scraps. *Sultan Qaboos University Journal for Science [SQUJS]*, 26(2), 98–106. <https://doi.org/10.53539/squjs.vol26iss2pp98-106>
- [6] Zhang, L., Wang, C. Y., & Wang, C. C. (2023). Mining resources from wastes to produce high value-added MOFs. In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 190). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106805>
- [7] Semyonov, O., Chaemchuen, S., Ivanov, A., Verpoort, F., Kolska, Z., Syrtanov, M., Svorcik, V., Yusubov, M. S., Lyutakov, O., Guselnikova, O., & Postnikov, P. S. (2021). Smart recycling of PET to sorbents for insecticides through in situ MOF growth. *Applied Materials Today*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100910>
- [8] Bardoquillo, E. I. M., Firman, J. M. B., Montecastro, D. B., & Basilio, A. M. (2023). Chemical recycling of waste polyethylene terephthalate (PET) bottles via recovery and polymerization of terephthalic acid (TPA) and ethylene glycol (EG). *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.04.160>
- [9] Sabde, S., Yadav, G. D., & Narayan, R. (2023). Conversion of waste into wealth in chemical recycling of polymers: Hydrolytic depolymerization of polyethylene terephthalate into terephthalic acid and ethylene glycol using phase transfer catalysis. *Journal of Cleaner Production*, 420, 138312. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.138312>
- [10] Jeya, G., Dhanalakshmi, R., Anbarasu, M., Vinitha, V., & Sivamurugan, V. (2022). A short review on latest developments in catalytic depolymerization of Poly (ethylene terephthalate) wastes. *Journal of the Indian Chemical Society*, 99(1), 100291. <https://doi.org/10.1016/J.JICS.2021.100291>
- [11] Vellini, M., & Savioli, M. (2009). Energy and environmental analysis of glass container production and recycling. *Energy*, 34(12), 2137–2143. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.09.017>
- [12] Pingale, N. D., & Shukla, S. R. (2008). Microwave assisted ecofriendly recycling of poly (ethylene terephthalate) bottle waste. *European Polymer Journal*, 44(12), 4151–4156. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.09.019>
- [13] Shiga, T., Tsukimura, T., Namai, Y., Togawa, T., & Sakuraba, H. (2021). Comparative urinary globotriaosylceramide analysis by thin-layer chromatography-immunostaining and liquid chromatography-tandem mass spectrometry in patients with Fabry disease. *Molecular Genetics and Metabolism Reports*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.ymgmr.2021.100804>
- [14] Rachmawati, D. P. S., Rabbani, K., Rumidatul, A., Fadhila, F., & Maryana, Y. (2020). Pengujian aktivitas antimikroba ekstrak kulit dan kayu ranting sengon (*falcataria moluccana*) dengan pelarut n-heksana, etil asetat dan metanol terhadap Enterobacteriaceae, *Staphylococcus aureus* dan *Candida albicans*. *Jurnal Media Analis Kesehatan*, 11(2), 70. <https://doi.org/10.32382/mak.v11i2.1711>

- [15] Wang, S., Xie, X., Xia, W., Cui, J., Zhang, S., & Du, X. (2020). Study on the structure activity relationship of the crystal MOF-5 synthesis, thermal stability and N₂adsorption property. *High Temperature Materials and Processes*, 39(2020), 171–177. <https://doi.org/10.1515/htmp-2020-0034>
- [16] Biserčić, M. S., Marjanović, B., Vasiljević, B. N., Mentus, S., Zasońska, B. A., & Ćirić-Marjanović, G. (2019). The quest for optimal water quantity in the synthesis of metal-organic framework MOF-5. *Microporous and Mesoporous Materials*, 278, 23–29. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.11.005>
- [17] Raed, K. Z. (2011). *Post consumer poly(ethylene terephthalate) depolymerization by waste of battery acid hydrolysis*. <https://www.researchgate.net/publication/371013443>
- [18] Biermann, L., Brepohl, E., Eichert, C., Paschetag, M., Watts, M., & Scholl, S. (2021). Development of a continuous PET depolymerization process as a basis for a back-to-monomer recycling method. *Green Processing and Synthesis*, 10(1), 361–373. <https://doi.org/10.1515/gps-2021-0036>
- [19] Prasetiowati, A. L., Prasetya, A. T., Wardani, S., Kimia, J., Matematika, F., Alam, P., & Semarang, U. N. (2018). Sintesis Nanopartikel Perak dengan Bioreduktor Ekstrak Daun Belimbing Wuluh (*Averrhoa bilimbi* L.) Uji Aktivasnya sebagai Antibakteri. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 7(2), 160–166.
- [20] Agostini I., Benedetta C., Riccardo G., Andrea M. R., David C., & Luca R. (2022). Recovery of Terephthalic Acid from Densified Post-consumer Plastic Mix by HTL Process. *Molecules*, 27(7112).