

Recycle Botol Plastik Polyethylene Terephthalate (PET) Menjadi Serat Nilon sebagai Perwujudan Sustainable Development dengan Prinsip Green Chemistry: A Review

Winda Putri Permata Sari^{1*}, Ainayya Wiene Fathiyyaturahma², dan Muhammad Ilham Purnomo Jati², dan Restu Aji Putra Pratama²

¹Program Doktoral Pendidikan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia ; email: windaputri.2024@student.uny.ac.id

²SMA Negeri 1 Pakem, Yogyakarta, Indonesia

ABSTRAK

Karya tulis ilmiah ini bertujuan memberikan gambaran umum dan penjelasan lengkap terkait teknologi tepat guna pemanfaatan limbah botol plastik (PET) yang dapat didaur ulang menjadi serat nilon dari sepuluh tahun terakhir dari berbagai jurnal internasional. Setelah melakukan pencarian pada database bereputasi nasional dan internasional dengan menggunakan pola kunci relevansi (Pola 1: "bottle plastic" "recycling" "fiber"; Pola 2 : "bottle plastic" "nylon fiber" "sustainable development" ; Pola 3: "PET" "nylon fiber" "green chemistry"), dari 20, terdapat 10 artikel yang relevan akan ditinjau secara sistematis. Tujuan sistematisnya adalah menghasilkan tinjauan umum dan pengetahuan mengenai daur ulang limbah botol plastik menjadi serat nilon yang dapat mewujudkan *sustainable development* dengan menggunakan prinsip-prinsip *green chemistry*. Berdasarkan hasil yang diperoleh, dapat ditarik kesimpulan bahwa daur ulang botol plastik (PET) dapat diubah menjadi serat nilon secara mekanis dan kimiawi. Mekanisme pembuatan nilon dari botol plastik bersifat ramah lingkungan yang dapat dijelaskan dengan pengintegrasian *green chemistry*. Penerapan prinsip *green chemistry* untuk menjelaskan topik ini yaitu prinsip ke 1 "*waste prevention instead of remediation*" dan ke 6 "*energy efficient by design*". Penelitian ini diharapkan dapat membuka pengetahuan lebih luas kepada masyarakat umum terkait gambaran umum dan penjelasan lengkap terkait tahapan teknologi tepat guna pemanfaatan limbah botol plastik (PET) yang dapat didaur ulang menjadi serat nilon.

Keywords: Daur ulang, *green chemistry*, sampah botol plastik, serat nilon, *sustainable development*

ABSTRACT

This scientific paper aims to provide an overview and complete explanation of the appropriate technology for the utilization of plastic bottle waste (PET) that can be recycled into nylon fiber from the last ten years from various international journals. After searching national and international reputable databases using key relevance patterns (Pattern 1: "bottle plastic" "recycling" "fiber"; Pattern 2: "bottle plastic" 'nylon fiber' 'sustainable development'; Pattern 3: 'PET' 'nylon fiber' 'green chemistry'), out of 20, 10 relevant articles will be systematically reviewed. The systematic goal is to produce an overview and knowledge about recycling plastic bottle waste into nylon fiber that can realize sustainable development using the principles of green chemistry. Based on the results obtained, it can be concluded that recycled plastic bottles (PET) can be converted into nylon fibers mechanically and chemically. The mechanism of making nylon from plastic bottles is environmentally friendly which can be explained by integrating green chemistry. The application of green chemistry principles to explain this topic is the 1st principle "*waste prevention instead of remediation*" and the 6th "*energy efficient by design*". This research is expected to open wider knowledge to the public regarding a complete overview and explanation of the stages of appropriate technology for the utilization of plastic bottle waste (PET) which can be recycled into nylon fiber.

Keywords: Green chemistry, Nylon fiber, Plastic bottle waste, Recycling, Sustainable development

Citation: Sari, W. P. P., Fathiyyaturahma, A. W., Jati, M. I. P., dan Pratama, R. A. P. (2025). *Recycle Botol Plastik Polyethylene Terephthalate (PET) Menjadi Serat Nilon sebagai Perwujudan Sustainable Development dengan Prinsip Green Chemistry: A Review*. Jurnal Ilmu Lingkungan, 23(3), 638-646, doi:10.14710/jil.23.3.638-646

1. PENDAHULUAN

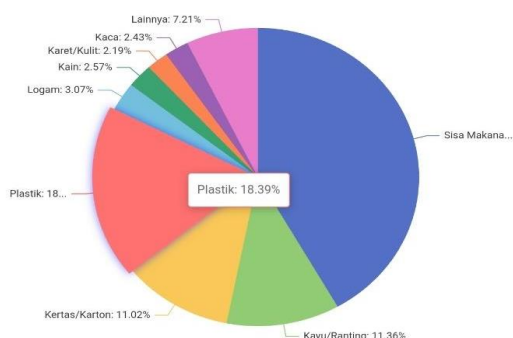
Masalah sampah menjadi sebuah permasalahan yang serius di seluruh dunia pada era modernisasi. Hal tersebut didasari oleh kurangnya kesadaran manusia terhadap isu-isu ekologi di sekitar (Huynh et

al., 2023). Perilaku tersebut banyak pengaruh negatif yang diberikan oleh permasalahan sampah, seperti bencana alam, gangguan kesehatan, pemanasan global, dan pencemaran lingkungan sekitar (Thomas et al., 2024). Banyak jenis-jenis sampah yang

dihasilkan setiap harinya, seperti sisa makanan, plastik, logam, dan lain lain. Sampah tersebut bersumber dari berbagai aktivitas yang dilakukan oleh manusia, contohnya seperti rumah tangga, industri, dan lain lain (Thomas *et al.*, 2024)

Sampai saat ini yang menjadi permasalahan sampah paling serius di seluruh dunia yaitu sampah plastik. Sekitar 70% plastik digunakan sebagai bahan pengemasan akan habis menjadi sampah plastik dengan waktu yang singkat (Pradha & Saranya, 2023). Padahal sampah plastik sendiri membutuhkan waktu yang cukup lama untuk bisa terurai kembali. Hal tersebut berbanding terbalik dengan cepatnya pertumbuhan sampah plastik pada saat ini. Diperkirakan sekitar 395 juta ton plastik diproduksi setiap tahunnya di seluruh dunia (Diao *et al.*, 2023). Bahkan berdasarkan data dari *ScienceMag* menjelaskan jumlah sampah plastik pada tahun 1950 sampai tahun 2015 di seluruh dunia terus meningkat. Hal ini disebabkan pada tahun 1950 jumlah produksi sampah setiap tahun yaitu 2 juta ton, sementara jumlah produksi sampah pada tahun 2015 setiap tahunnya menyentuh hingga 381 juta ton. Lalu di antara 6,300 juta ton berakhir sebagai limbah. Sekitar 800 juta ton (12%) sampah ini dibakar, 600 juta ton (9%) didaur ulang dan hanya 10% yang didaur ulang lebih dari satu kali. Hal tersebut dapat disimpulkan bahwa sisa sampah akan dibuang di lingkungan alam, sehingga jika penanganan tersebut terus dilakukan maka akan membawa dampak yang lebih buruk lagi kedepannya (Norton *et al.*, 2020).

Berdasarkan hasil penelitian dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) mengenai pertumbuhan sampah yang ada di Indonesia pada tahun 2023. Memperoleh sebuah hasil yang dimana dari jumlah 100% keseluruhan sampah di Indonesia, sampah plastik menjadi penyumbang terbanyak ke-2 sekitar 18,39% setelah sampah sisa makanan. Akibat permasalahan tersebut Indonesia masih dalam kondisi darurat sampah terutama pada sampah plastik. Data tersebut dapat diperjelas pada Gambar 1.



Sumber: <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/public/data/komposisi>
Gambar 1. Data Komposisi Sampah di Indonesia

Sampah plastik pada umumnya mengandung sebuah *Polyethylene Terephthalate* (PET) (Thomas *et al.*, 2024). PET banyak digunakan sebagai bahan utama dalam pembuatan produk botol plastik, kemasan makanan, dan bahan tekstil (Thomas *et al.*,

2024). Hal ini didasari karena PET memiliki bahan material yang ringan, tahan lama, tahan terhadap zat kimia, dan menjadi bahan yang penting bagi masyarakat modern (Joseph *et al.*, 2024). Namun, apabila penggunaan PET di kalangan industri dan masyarakat meningkat tentunya dapat menyebabkan krisis global dalam pengelolaan limbah. Limbah botol plastik PET yang dibakar akan mengeluarkan gas berbahaya yang membahayakan kesehatan manusia. Selain itu, pembuangan yang tidak tepat dapat menimbulkan dampak yang signifikan terhadap kerusakan alam dan mengakibatkan penyumbatan saluran air serta mencemari sumber daya air di bumi (Pradha & Saranya, 2023).

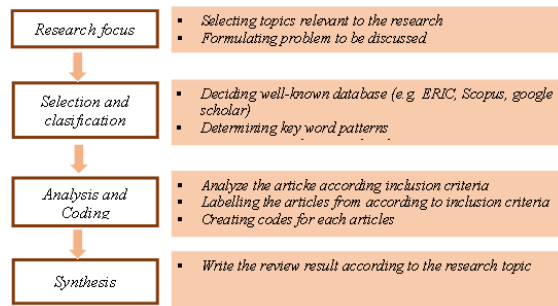
Pertumbuhan sampah plastik yang terus meningkat secara drastis menuntut kita sebagai makhluk hidup untuk memiliki sebuah inovasi agar permasalahan tersebut dapat terkontrol. Strategi ini penting untuk dilakukan dan diterapkan di tingkat global untuk mengurangi dampaknya terhadap kualitas lingkungan. Teknologi daur ulang (*upcycling*) telah diidentifikasi sebagai salah satu cara untuk mengatasi dan mengurangi permasalahan sampah (Lee *et al.*, 2019; Tonsi *et al.*, 2023). Bentuk inovasi tersebut yaitu merubah botol plastik menjadi serat kain nilon (Thomas *et al.*, 2024). Nilon merupakan polimer sintetik yang banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari (Lee *et al.*, 2019). Oleh karena itu, banyak penelitian yang dilakukan untuk mereview pemanfaatan botol plastik PET menjadi serat kain nilon untuk memenuhi target salah satu tujuan pembangunan berkelanjutan (*Sustainable Development*) pada program *United Nations' 2030* pada bagian *green economy* (Farooq *et al.*, 2022). *Green economy* dilatar belakangi adanya krisis pergeseran gaya hidup individu yang menginginkan semua serba mudah dan cepat. *Green economy* berfokus pada pengembangan teknologi baru dan industri bersih untuk menciptakan dan meningkatkan modal alam dan mengurangi risiko dari bahaya lingkungan (Yupita *et al.*, 2023). Pencapaian *green economy* dapat mengintegrasikan *green chemistry* dalam proses kimianya. Daur ulang sampah plastik yang mengandung PET dapat memberikan peluang yang bagus untuk mengurangi dampak lingkungan dan biaya pembuangan sampah plastik, mengurangi produk petrokimia mentah, mengurangi volume sampah di Tempat Pembuangan Akhir (TPA), dan meminimalisir emisi karbon dioksida (CO₂) di lingkungan sekitar (Huynh *et al.*, 2023; Joseph *et al.*, 2024). Daur ulang PET melibatkan pengumpulan produk PET bekas, mengolah menjadi produk baru, dan menggunakannya untuk memproduksi produk baru (Joseph *et al.*, 2024).

Berdasarkan permasalahan di atas, studi literatur ini memberikan gambaran umum dan penjelasan dengan mensintesis artikel yang berkaitan dengan daur ulang sampah botol plastik, khususnya yang mengandung PET menjadi serat kain nilon lebih luas dan mendalam dalam sepuluh tahun terakhir dan

penjelasan beberapa pengintegrasian *green chemistry* melalui daur ulang tersebut. Kontribusi yang dihasilkan dari studi literatur ini dapat memberikan pemahaman daur ulang botol plastik yang mengandung PET dengan menjelaskan beberapa prinsip *green chemistry* yang diintegrasikan dalam prosesnya.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode SLR yaitu *systematic literature review* yang berfokus pada panelitian 10 terakhir (Maret 2014 - Maret 2024). Tinjauan pustaka sistematis (SLR) merupakan tinjauan pustaka untuk menemukan dan mensintesis semua penelitian yang relevan untuk menilai apa yang diketahui tentang topik cara mendaur ulang botol plastik menjadi serat nilon dan *green chemistry* dengan membuat tema dan template (Bağ & Çalık, 2017; Çalık & Sözbilir, 2014). Analisis data meliputi reduksi data, penyajian data, dan penarikan kesimpulan dengan tahapan penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 2. Tahapan Penelitian Syestematic Review

2.1. Research Focus & Selection dan Classification

Tabel 1. Kriteria Inklusi Artikel

Kriteria	Deskripsi
Inklusi	Publikasi jurnal internasional Penelitian ditulis dalam bahasa Inggris Penelitian dipublikasikan 10 tahun terakhir (2014-2024) Penelitian ini terkait daur ulang botol plastik (PET) menjadi polimer Studi dalam artikel memuat penjelasan kegiatan ramah lingkungan melalui daur ulang botol plastik baik untuk lingkungan rumah tangga maupun lingkungan industri

Tahap awal dalam melakukan *systematic literature review* dimana peneliti menentukan topik penelitian yaitu daur ulang botol plastik menjadi serat nilon dengan mengintegrasikan *green chemistry*. Peneliti mencari artikel dari database nasional dan internasional seperti *google scholar*, *scopus link*, dan *ACS publishing*, dengan pola kata kunci yang relevan (Pola 1: "bottle plastic" "recycling" "fiber"; Pola 2: "bottle plastic" "nylon fiber" "sustainable development"; Pola 3: "PET" "nylon fiber" "green chemistry"). Penerapan *green chemistry* dalam pengembangan teknologi tepat guna daur ulang botol plastik menjadi polimer dalam artikel sudah cukup familiar untuk dibahas. Peneliti membaca bagian

abstrak untuk mengetahui apakah dalam artikel tersebut menjelaskan terkait daur ulang botol plastik menjadi serat nilon dan penjelasan ramah lingkungan di dalamnya. Artikel-artikel yang ditemukan tidak semua memenuhi beberapa kriteria yang sesuai dengan topik yang diinginkan. Kriteria-kriteria yang digunakan dalam penelitian disebut dengan kriteria inklusi yang dijabarkan dalam Tabel 1.

2.2. Analysis and Coding

Terdapat 10 artikel relevan dari 20 artikel yang diperoleh setelah dilakukan *review* yang dapat digunakan dalam tinjauan literatur sistematis. Langkah selanjutnya adalah pemberian label nomor 1 sampai 10 pada 10 artikel tersebut, seperti tertera pada Tabel 2. Artikel hasil seleksi kemudian diberikan kode primer berdasarkan tujuh kelompok: tujuan penelitian, metode penelitian, sumber limbah, mekanisme daur ulang, dan implementasi *green chemistry*. Selanjutnya, analisis kode di dalam dan/atau di semua studi yang disertakan, diikuti dalam proses sintesis naratif studi ini.

2.3. Synthesis

Tahap terakhir adalah menulis hasil tinjauan literature yang sistematis (Tabel 2).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Tujuan Artikel dan Sumber Limbah

Analisis tinjauan sistematis berupaya memberikan gambaran umum dari tujuan untuk mendaur ulang limbah botol plastik (PET) menjadi serat nilon secara berkelanjutan dengan menerapkan beberapa prinsip *green chemistry* yang dibahas dalam artikel-artikel tersebut. Hasil menunjukkan bahwa sebagian besar artikel berfokus untuk menjelaskan daur ulang limbah botol plastik menjadi bahan lebih produktif (serat/benang) secara berkelanjutan. Limbah botol plastik PET merupakan sumber limbah yang disebutkan pada artikel-artikel tersebut. PET (*polyethylene terephthalate*) adalah bahan yang paling populer digunakan karena tahan lama dan sangat ringan untuk dibawa (Joseph *et al.*, 2024). PET telah menjadi material penting dalam masyarakat modern karena banyak digunakan untuk mengemas makanan, botol air, wadah paling saus salad, sampo, dan bahkan sabun cair (Patti *et al.*, 2021; Joseph *et al.*, 2024). Meningkatnya penggunaan PET juga telah menyebabkan krisis global dalam pengelolaan limbah, karena pembuangan produk PET yang tidak tepat telah menyebabkan kerusakan lingkungan yang signifikan (Joseph *et al.*, 2024). Menurut laporan Program Lingkungan PBB, 400 juta ton sampah plastik sekali pakai dihasilkan secara global setiap tahunnya, yang merupakan 47% dari total sampah plastik. Berdasarkan data tersebut, hanya 9% plastik yang didaur ulang di seluruh dunia (Subha Pradha & Saranya, 2023). Sampah atau limbah yang kita buang ke tempat sampah setiap hari bisa didaur ulang, digunakan kembali, dan diciptakan kembali (Haryanti *et al.*, 2023). Sampah seperti sisa pakaian, sisa

Sari, W. P. P., Fathiyaturahma, A. W., Jati, M. I. P., dan Pratama, R. A. P. (2025). *Recycle Botol Plastik Polyethylene Terephthalate (PET) Menjadi Serat Nilon sebagai Perwujudan Sustainable Development dengan Prinsip Green Chemistry: A Review*. Jurnal Ilmu Lingkungan, 23(3), 638-646, doi:10.14710/jil.23.3.638-646

makanan (seperti sisik ikan) dan botol plastik merupakan jenis bahan utama yang dapat digunakan kembali dengan menggunakan proses teknologi sederhana untuk menghasilkan kain daur ulang

(Putra & Yuriandala, 2010; Tonsi *et al.*, 2023; Joseph *et al.*, 2024). Oleh karena itu, perlu adanya daur ulang berupa botol plastik PET menjadi bahan yang lebih bermanfaat.

Tabel 2. Artikel dalam Tinjauan Systematic Literatur

Kode	Penulis Artikel	Judul Artikel	Nama Jurnal	Substansi
1	Choudhury, A. K. R.	<i>Green chemistry and textile industry</i>	<i>Journal of Textile Engineering & Fashion Technology</i>	Prinsip-prinsip kimia ramah lingkungan menawarkan solusi hulu terhadap banyak masalah kesehatan, lingkungan, dan ekonomi yang ditimbulkan oleh bahan kimia industri Dawson. Sumber limbah PET dapat di daur ulang secara kimiawi menjadi serat nilon.
2	Larson, A., O'Brien, K., & Anderson, A.	<i>Shaw industries: Sustainable business, entrepreneurial innovation, and green chemistry</i>	<i>American Chemical Society</i>	Penjelasan 12 prinsip green chemistry dan prinsip <i>green industry</i> , sumber limbah dari botol plastik mengandung PET yang di konversi atau daur ulang menjadi serat karpet.
3	Patti, A., Cicala, G., & Acierno, D.	<i>Eco-sustainability of textile production: Waste recovery and current recycling in the composite's world</i>	<i>Polymers</i>	<i>Green composites</i> (prinsip kimia harus dipotimalkan untuk menghasilkan jumlah limbah seminimal mungkin). Penjelasan terkait beberapa mekanisme secara kimiawi daur ulang PET menjadi serat.
4	Valenzuela-Ortega, M., Suitor, J. T., White, M. F. M., Hinchcliffe, T., & Wallace, S.	<i>Microbial Upcycling of Waste PET to Adipic Acid</i>	<i>American Chemical Society</i>	Efisiensi energi: daur ulang menggunakan mikroorganisme yang dapat direkayasa secara genetis untuk mengubah bahan baku limbah yang berlipah menjadi molekul kecil bernilai tambah daripada berbahan baku sumber daya fosil yang semakin lama semakin berkurang.
5	Aishwariya	<i>A contaminant of concern - microplastics and microfibers</i>		Penjelasan beberapa mekanisme reaksi untuk daur ulang PET menjadi serat nilon.
6	Benyathiar, P., Kumar, P., Carpenter, G., Brace, J., & Mishra, D. K.	<i>Polyethylene Terephthalate (PET) Bottle-to-Bottle Recycling for the Beverage Industry: A Review</i>	<i>Polymers</i>	Prinsip <i>green chemistry</i> ke - 6
7	Seval, U.	<i>The bursting strength properties of knitted fabrics containing recycled polyester fiber</i>	<i>The Journal of The Textile Institute</i>	Prinsip <i>green chemistry</i> ke - 6 daur ulang yang relevan seperti 10 botol PET sama dengan 1 pon serat rPET, dan 1 ton (2000) lbs botol plastik daur ulang menghemat 3,8 barel minyak, di mana 1 juta botol plastik daur ulang menghemat 250 barel minyak, dan juga, 1 juta botol plastik daur ulang menghilangkan 180 metrik ton emisi CO2 yang dilepaskan ke atmosfer, dan dibutuhkan energi 8 kali lebih sedikit untuk mendaur ulang botol plastik daripada memproduksi botol plastik baru dalam jumlah yang setara, dan terakhir, 150 pakaian bulu domba atau 500 kaos atau 50 tas ransel yang terbuat dari botol plastik daur ulang dapat menghemat 1 barel minyak)
8	Werner, A. Z., Clare, R., Mand, T. D., Pardo, I., Ramirez, K. J., Haugen, S. J., Bratti, F., Dexter, G. N., Elmore, J. R., Huenemann, J. D., Peabody, G. L., Johnson, C. W., Rorrer, N. A., Salvachúa, D., Guss, A. M., & Beckham, G. T.	<i>Tandem chemical deconstruction and biological upcycling of poly (ethylene terephthalate) to β-ketoadipic acid by <i>Pseudomonas putida</i> KT2440</i>	<i>Metabolic Engineering</i>	Prinsip <i>green chemistry</i> ke-9 (<i>saving energy</i>), menjelaskan otensi dekonstruksi katalitik tandem dan konversi biologis sebagai sarana untuk mendaur ulang limbah PET
9	Maitlo, G., Ali, I., Maitlo, H. A., Ali, S., Unar, I. N., Ahmad, M. B., Bhutto, D. K., Karmani, R. K., Naich, S. ur R., Sajjad, R. U., Ali, S., & Afridi, M. N.	<i>Plastic waste recycling, applications, and prospects for a sustainable environment</i>	<i>Polymers</i>	Memanfaatkannya sampah plastik untuk ekonomi sirkular dan daur ulang untuk berbagai produk bernilai tambah melalui penjelasan dampak negatif terhadap lingkungan dari sampah plastik akumulasi sampah plastik dan pentingnya teknik modern untuk pengelolaan sampah.
10	Tonsi, G., Maesani, C., Alini, S., Ortenzi, M. A., & Pirola, C.	<i>Nylon recycling processes: a brief overview</i>	<i>Chemical Engineering Transactions</i>	<i>Daur ulang mekanis, yang melibatkan penghancuran dan peleburan sampah plastik untuk dijadikan baru produk, pelarutan pelarut, dimana pelarut secara selektif hanya melarutkan polimer yang diinginkan dan meninggalkannya kotoran yang tidak diinginkan, dan daur ulang kimia, yang menggunakan reaksi kimia untuk memecah sampah plastik menjadi bagian penyusun kimianya, yaitu Monomer.</i>

Berdasarkan hasil tinjauan sistematis pada sepuluh artikel yang digunakan, dijelaskan bahwa terdapat dua macam cara untuk daur ulang limbah botol plastik yaitu daur ulang secara mekanis dan kimia (Patti *et al.*, 2021). Daur ulang mekanis merupakan metode umum yang digunakan karena menghemat biaya, sedangkan daur ulang kimia memerlukan keahlian, keterampilan khusus, dan inovasi sehingga dapat menghasilkan produk yang lebih berkualitas, efisien, dan berkelanjutan. Daur ulang botol plastik dapat memberikan kontribusi pada ekonomi sirkular dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan akibat dari produk PET (Joseph *et al.*, 2024). Pembuatan nilon dari sampah plastik bekas sangatlah ramah lingkungan. Teknologi ini termasuk teknologi tepat guna berkelanjutan dengan memanfaatkan sampah plastik dibandingkan menghabiskan cadangan fosil yang tidak dapat diperbarui untuk menghasilkan serat nilon (Tonsi *et al.*, 2023). Bahan baku pembuatan nilon daur ulang ini dapat dikumpulkan sebelum dan sesudah digunakan konsumen. Pemilihan bahan baku tergantung pada proses pembuatannya. Ada berbagai cara untuk mendaur ulang sampah plastik, dan dalam produksi kain nilon daur ulang, metode yang umumnya dilakukan adalah mekanis atau kimia (Baillif & Oksman, 2009).

3.2. Mekanisme Daur Ulang

Teknik daur ulang yang penting dari PET adalah daur ulang mekanis dan daur ulang kimia (Joseph *et al.*, 2024). Daur ulang PET penting untuk keberlanjutan dan pelestarian sumber daya. Berikut penjelasan terkait daur ulang mekanis dan kimia.

1. Daur Ulang Mekanis

Daur ulang botol PET adalah salah satu solusi penting untuk mengurangi limbah plastik dan mengurangi krisis global (Joseph *et al.*, 2024). Berdasarkan hasil tinjauan sistematis sepuluh artikel dijelaskan bahwa terdapat daur ulang mekanis dan daur ulang kimiawi. Daur ulang mekanis merupakan proses menggunakan kembali limbah plastik dengan cara melibatkan penggilingan dan ekstrusi ulang (Bagus, 2007). Tahap akhir dari proses daur ulang mekanis adalah ekstrusi, dimana serpihan plastik PET dilebur dan diekstrusi menjadi pelet, yang dapat digunakan untuk menghasilkan produk baru (Joseph *et al.*, 2024).

a. Pengumpulan dan Penyortiran

Langkah pertama dalam pengumpulan adalah pemisahan produk PET dari bahan lain, yang dapat dilakukan dengan teknologi penyortiran manual atau penyortiran otomatis. Menyortir produk PET berdasarkan jenisnya dapat meningkatkan kualitas dan konsistensi bahan daur ulang, karena jenis polimer PET yang berbeda mungkin memiliki sifat leleh dan pencetakan yang berbeda. Teknologi penyortiran otomatis seperti sensor, magnet, atau penyortir optik dapat meningkatkan efisiensi dan akurasi penyortiran proses.

b. Merobek dan Menggiling

Proses ini memecah sampah menjadi potongan-potongan kecil yang mudah dikelola, menghilangkan kontaminan yang lebih besar seperti label dan tutup, menyederhanakan langkah-langkah hilir dan mengurangi kebutuhan akan metode pembuangan yang mahal. Proses penghancuran dan penggilingan dalam daur ulang PET meningkatkan efisiensi, keserbagunaan, dan efektivitas biaya dengan mengurangi limbah menjadi partikel yang lebih kecil. Penggilingan diperlukan karena hanya bahan homogen dengan ukuran tertentu yang dapat dimasukkan ke dalam pabrik ekstrusi atau cetakan injeksi.

c. Pencucian dan Pemisahan

Pembilasan menghilangkan sisa deterjen dan kontaminan terlarut, sehingga menghasilkan PET yang bersih dan murni, siap untuk perawatan lebih lanjut. Bahan PET dipisahkan dari polimer plastik lainnya, bahan non-plastik, dan kontaminan dalam aliran limbah campuran menggunakan teknik seperti pemisahan berdasarkan kepadatan, klasifikasi udara, pemilahan magnetik atau optik, dan pemisahan hidrosiklon. Pemisahan berbasis kepadatan memisahkan material PET yang lebih berat dari kontaminan yang lebih ringan.

d. Pengeringan dan Peleburan

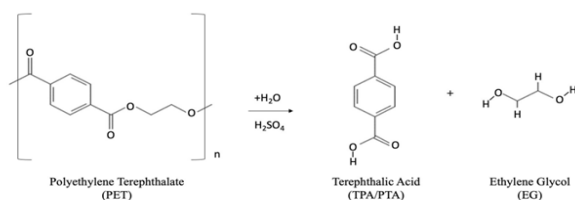
Tahap proses pengeringan dan peleburan melibatkan penggunaan udara panas untuk menguapkan sisa air dan panas untuk melelehkan sampah plastik PET menjadi cairan cair. Pengeringan dalam proses ini penting untuk membatasi selama pemrosesan reaksi hidrolisis termal yang mengakibatkan penurunan berat molekul. Masalah ini juga dapat diatasi sebagian dengan menambahkan stabilizer. Dalam situasi ini, material yang diperoleh kembali dapat menunjukkan kualitas yang baik bahkan setelah beberapa siklus pemrosesan ulang dan tanpa pengeringan (La Mantia *et al.*, 2002). Proses peleburan dapat dilakukan dengan menggunakan berbagai metode, seperti pemanasan langsung dan pemanasan tidak langsung (Achillas, 2012). Plastik PET yang telah meleleh dapat diekstrusi menjadi berbagai bentuk atau dicetak menjadi produk tertentu, seperti botol, serat, atau film untuk memastikan bahwa plastik PET daur ulang memiliki kualitas tinggi (Feil & Pretz, 2020).

2. Daur Ulang Kimia

Daur ulang PET secara kimia (*chemical recycling*) menjadi kajian yang menarik bagi ilmuwan Brady (2022). PET didopolimerisasi menjadi monomer dasar atau oligomer (Benyathiar *et al.*, 2022). PET dapat dipolimerisasi menjadi asam tereftalat (TPA) dan etilen glikol (EG) melalui hidrolisis (Sheldon & Brady, 2022).

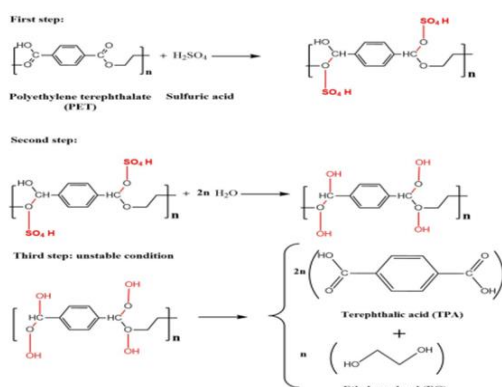
Proses hidrolisis dapat dilakukan pada suhu dan tekanan yang tinggi dalam keadaan asam (hidrolisis asam), basa (hidrolisis basa), atau netral (hidrolisis

netral) (Moran, 1994; Sheel & Pant, 2019; Tonsi *et al.*, 2023). Beberapa zat asam dapat digunakan untuk proses hidrolisis asam seperti asam sulfat (H_2SO_4), asam nitrat (HNO_3), asam fosfat (H_3PO_4). Asam yang paling umum digunakan adalah asam sulfat untuk



Gambar 3. Reaksi Hidrolisis Asam PET

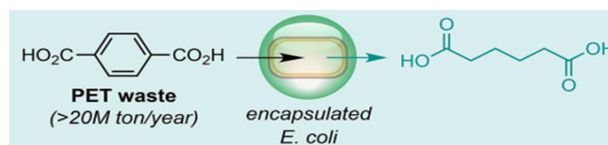
Mekanisme reaksi hidrolisis asam, langkah pertama asam sulfat bereaksi dengan oksigen (ikatan rangkap) dari PET. Langkah kedua yaitu penambahan air (H_2O) menyebabkan HSO_4^- digantikan dengan gugus hidroksil ($-\text{OH}$). Langkah terakhir yaitu ikatan karbon karbon dengan gugus hidroksil secara kimia tidak stabil sehingga dipecah menjadi TPA dan EG (Abedsoltan, 2023). Penjelasan terkait mekanisme reaksi hidrolisis asam terhadap PET dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 4. Mekanisme Reaksi PET menjadi TPA dan EG

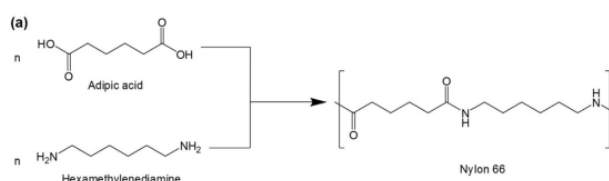
TPA dapat diubah menjadi asam β -keto adipat dengan bantuan strain *Pseudomonas putida*. Proses ini menggunakan glikolisis kemokatalitik untuk mendekonstruksi asam tereftalat dalam PET menjadi BHET, yang kemudian BHET dapat diubah menjadi β -asam keto adipate menggunakan bantuan bakteri *Pseudomonas putida*. TPA juga dapat diubah menjadi asam adipat (AA)/ asam alifatik 1,6-dikarboksilat. TPA dapat diubah menjadi asam adipat dengan bantuan strain *Escherichia coli*. Hal ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Valenzuela-Ortegata (2023) melaporkan bahwa penggunaan sel mikroba (*Escherichia coli*) dapat digunakan sebagai bioteknologi untuk mendaur ulang plastik PET. Reaksi ini berlangsung dalam media berair pada suhu kamar dan menghasilkan asam adipat 79% dalam 24 jam ketika sel diimobilisasi dalam hydrogel alginat (Valenzuela-Ortega *et al.*, 2023). Gambar 6 menunjukkan PET dapat didaur ulang biologis asam tereftalat menjadi asam adipat.

hidrolisis asam dan asam sulfat dapat mengurangi konsumsi energi dari proses penurunan kebutuhan tekanan dan suhu tinggi (Benyathiar *et al.*, 2022). Reaksi antara PET dengan asam sulfat dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 5. Reaksi PET menjadi Asam Adipat

Asam adipat atau asam β -keto adipat dapat memproduksi nilon (nilon-6,6) melalui polimer kondensasi dengan 1,6- heksametilenadamina (Botelho *et al.*, 2001; Pelckmans *et al.*, 2017), reaksi dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 6. Reaksi Asam Adipat dengan 1,6- Heksametilenadamina

Berdasarkan tinjauan literatur di atas, secara umum daur ulang PET merupakan solusi penting untuk mengurangi sampah plastik dan mitigasi krisis global. Da ur ulang mekanis dan kimia sama-sama memiliki keunggulan dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dan melestarikan sumber daya alam. Perbedaan diantara keduanya, da ur ulang mekanis paling umum digunakan sebagai teknologi untuk da ur ulang PET, memiliki konsumsi energi dan biaya rendah serta waktu yang dibutuhkan lebih singkat, tetapi hasil produknya memiliki kualitas lebih rendah dibandingkan polimer asli. Da ur ulang kimia menghasilkan produk da ur ulang nilon yang lebih berkualitas dibandingkan dengan hasil da ur ulang mekanis, tetapi konsumsi energi dan biaya lebih tinggi serta terdapat peralatan khusus ketika melakukan da ur ulang secara kimia (Graham *et al.*, 2022; Joseph *et al.*, 2024).

3.3. Green Chemistry

Sustainable development, green chemistry, kimia hijau, sustainable chemistry, green industry, dan *green economy* telah menjadi tren istilah yang saat ini sering dikaji oleh para ahli (Mitarlis *et al.*, 2023). *Sustainable development* mempunyai 17 tujuan yang diusulkan untuk pembangunan yang berkelanjutan di masa depan. Salah satu tujuan *sustainable development* adalah gagasan ekonomi sirkular (*green economy*) yang dapat dicapai dengan mengimplementasikan prinsip-prinsip *green chemistry*. *Recycling* (da ur ulang) merupakan salah satu hal inovasi yang ditawarkan pada kegiatan penerapan *circular*

economy dan *green chemistry* untuk mencapai pembangunan berkelanjutan dalam bidang industri.

Daur ulang plastik merupakan hal yang masuk akal, baik secara lingkungan maupun ekonomi, dengan mengurangi polusi dan mengoptimalkan penggunaan sumber daya. Kemasan plastik umumnya melibatkan polimer termoplastik yang pada prinsipnya, dapat didaur ulang menjadi resin polimer murni (Sheldon & Norton, 2020). Biaya bahan daur ulang polimer jauh lebih rendah dibandingkan sebelumnya, sehingga daur ulang bahan mentah bisa sangat bermanfaat bagi pabrik daur ulang (Joseph *et al.*, 2024). Plastik yang paling mudah untuk ditangani adalah PET karena telah banyak dilakukan daur ulang secara global (Ncube *et al.*, 2023).

Pengintegrasian *green chemistry* merupakan hal penting untuk dilakukan karena 14 program dari 17 tujuan program pada agenda *United Nations' 2023* menyerukan penerapan konsep dan pola pikir *green chemistry* (Kurowska-Susdorf *et al.*, 2019). *Green chemistry* merupakan suatu pendekatan yang berfokus pada desain dan prosedur produk yang menghilangkan atau meminimalkan dampak bahan kimia berbahaya (Armenta *et al.*, 2023). *Green chemistry* merupakan sebuah cara berpikir tentang memanfaatkan serangkaian prinsip yang berupaya mengurangi dampak buruk terhadap lingkungan dari proses dan produk kimia serta berkontribusi terhadap pembangunan berkelanjutan (Ncube *et al.*, 2023). Prinsip-prinsip kimia ramah lingkungan menawarkan solusi hulu terhadap banyak masalah kesehatan, lingkungan, dan ekonomi yang ditimbulkan oleh bahan kimia industri Dawson (Choudhury, 2017). Dua belas prinsip '*Green Chemistry*', pertama diterbitkan oleh Anastas dan Warner pada tahun 1998 (Sheldon & Norton, 2020) sebagai berikut.

1. Pencegahan limbah dibandingkan remediasi
2. Efisiensi atom
3. Bahan yang lebih sedikit berbahaya
4. Produk yang dirancang lebih aman
5. Pelarut dan bahan pembantu yang tidak berbahaya
6. Hemat energi berdasarkan desain
7. Lebih disukai bahan mentah terbarukan
8. Sintesis lebih singkat (hindari derivatisasi)
9. Reagen katalitik dibandingkan reagen stoikiometri.
10. Merancang produk untuk degradasi
11. Metodologi analitis untuk pencegahan polusi
12. Proses yang pada dasarnya lebih aman

Berdasarkan artikel yang dianalisis, sebagian besar prinsip *green chemistry* yang diintegrasikan dalam daur ulang botol plastik PET menjadi serat nilon adalah prinsip *green chemistry* 1 dan 6. Prinsip *green chemistry* 1 "*waste prevention instead of remediation*", ada beberapa fakta yang relevan seperti dalam karya Wang, telah dilaporkan bahwa di industri Amerika Serikat, sekitar 1,4 juta ton serat (seperti nilon (60%), poliolefin (29%), poliester (10%), dan wol (0,3%)) telah dihabiskan per tahun untuk

produksi karpet. Setiap 5-10 tahun sekali, karpet lama harus diganti dengan karpet baru, dengan cara ini, jumlah limbah yang dihasilkan setara dengan 2-3 juta ton per tahun di Amerika Serikat dan sekitar 4-6 juta ton per tahun di seluruh dunia (Patti *et al.*, 2021). Prinsip ini secara sederhana menyatakan bahwa proses kimia harus dioptimalkan untuk menghasilkan jumlah limbah seminimal mungkin. Masalah ini dapat diatasi dengan cara mendaur ulang sampah plastik dalam produksi kain nilon melalui daur ulang mekanis dan kimiawi. Teknologi ini memanfaatkan limbah botol plastik dibandingkan menghabiskan candangan sumber daya fosil yang tidak terbarukan untuk menghasilkan nilon.

Prinsip *green chemistry* ke 6 "*energy efficient by design*" ada beberapa fakta daur ulang yang relevan seperti 10 botol PET sama dengan 1 pon serat rPET, dan 1 ton (2000) lbs botol plastik daur ulang menghemat 3,8 barel minyak, di mana 1 juta botol plastik daur ulang menghemat 250 barel minyak, dan Selain itu, 1 juta botol plastik daur ulang menghilangkan 180 metrik ton emisi CO₂ yang dilepaskan ke atmosfer, dan dibutuhkan energi 8 kali lebih sedikit untuk mendaur ulang botol plastik daripada memproduksi botol plastik baru dalam jumlah yang setara, dan akhirnya, 150 pakaian bulu domba atau 500 t-shirt atau 50 ransel yang terbuat dari botol plastik daur ulang dapat menghemat 1 barel minyak). Cara mengatasi yang sesuai prinsip ini yaitu dengan daur ulang kimia botol PET. Daur ulang ini menggunakan mikroorganisme yang dapat direkayasa secara genetis untuk mengubah bahan baku limbah yang berlimpah menjadi molekul kecil bernilai tambah yang seharusnya dapat diproduksi dari sumber daya fosil yang semakin berkurang (Valenzuela-Ortega *et al.*, 2023). Pembuatan nilon daur ulang menggunakan kimia memiliki potensi menghasilkan gas efek rumah kaca lebih rendah dibandingkan pembuatan serat nilon murni. Produksi benang nilon melalui daur ulang secara kimia menggunakan energi 50% lebih sedikit dan menghemat sekitar 50% emisi karbon dibandingkan dengan produksi benang nilon murni. Kemudian, daur ulang botol plastik PET menjadi nilon secara mekanis lebih rendah energi yang dibutuhkan dibandingkan dengan pembuatan nilon secara kimia (Kijo-Kleczkowska & Gnatowski, 2022). Berdasarkan pernyataan tersebut, terbukti bahwa daur ulang botol plastik (PET) yang di daur ulang menjadi serta nilon baik secara mekanis maupun kimia menerapkan prinsip *green chemistry* ke enam karena dapat menghemat energi dan dapat mengurangi emisi karbon dibandingkan dengan pembuatan serat nilon murni.

Berdasarkan pembahasan di atas, dapat disimpulkan bahwa limbah sampah plastik berupa botol plastik (PET) dapat didaur ulang menjadi produk yang memiliki nilai lebih berharga yaitu serat nilon. Konsep daur ulang telah mendapat banyak perhatian di seluruh dunia, terutama dalam hal daur ulang sampah plastik. Sulit untuk sepenuhnya

menghilangkan penggunaan plastik dari kehidupan sehari-hari. Daur ulang PET adalah bagian penting dari ekonomi sirkular, yang bertujuan untuk mengurangi limbah, penggunaan bahan baru dan melestarikan sumber daya. Ekonomi sirkular didasarkan pada prinsip-prinsip perancangan keluar limbah dan polusi, menjaga produk dan bahan dalam penggunaan, dan regenerasi sistem alami (Sheldon & Norton, 2020). Pengembangan dan optimalisasi teknologi daur ulang PET akan memainkan peran penting dalam mencapai masa depan yang berkelanjutan (Joseph *et al.*, 2024). Sesuai dengan beberapa artikel yang telah ditinjau, mekanisme pembuatan daur ulang nilon merupakan teknologi tepat guna dari pemanfaatan limbah yang mendukung penerapan *green chemistry* sebagai wujud pencapaian pembangunan berkelanjutan (Amalia & Yulandr, 2022).

4. KESIMPULAN

Kebaruan-kebaruan artikel yang digunakan dalam *systematic literature* ini memberikan gambaran umum, informasi secara lengkap terkait teknologi tepat guna pemanfaatan limbah botol plastik (PET) yang dapat didaur ulang menjadi serat nilon. Mekanisme daur ulang botol plastik (PET) untuk diubah menjadi serat nilon secara mekanis dan kimiawi. Mekanisme pembuatan nilon dari botol plastik bersifat ramah lingkungan yang dapat dijelaskan dengan pengintegrasian *green chemistry* dalam prosesnya sebagai wujud tercapainya pembangunan berkelanjutan (*sustainable development*) dalam *green economy*. Penerapan prinsip *green chemistry* untuk menjelaskan topik ini yaitu prinsip ke 1 “*waste prevention instead of remediation*” dan ke 6 “*energy efficient by design*”.

DAFTAR PUSTAKA

- Abedsoltan, H. (2023). A focused review on recycling and hydrolysis techniques of polyethylene terephthalate. In *Polymer Engineering and Science*, 63(9), pp. 2651–2674). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/pen.26406>
- Aishwariya, & Juliet, R. (2021). *A contaminant of concern - microplastics and microfibers*. 48(11).
- Amalia, J. N., & Yulandr, A. (2022). Pendekatan green chemistry suatu inovasi dalam pembelajaran kimia berwawasan lingkungan. *Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh*, 1(1), 1–58.
- Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. In *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), pp. 1596–1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>
- Bağ, H., & Çalik, M. (2017). A thematic review of argumentation studies at the K-8 level. *Education and Science*, 42(190), 281–303. <http://dx.doi.org/10.15390/EB.2017.6845>
- Benyathiar, P., Kumar, P., Carpenter, G., Brace, J., & Mishra, D. K. (2022). Polyethylene terephthalate (PET) bottle-to-bottle recycling for the beverage industry: A Review. In *Polymers*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/polym14122366>
- Booij, M., Helene, Y., Kurt, B., Hommez, S., Eric, O., & Goethals, J. (2000). 54) *Depolymerization Of Polyamides 75 Inventors*.
- Çalik, M., & Sözbilir, M. (2014). The parameters of the content analysis. *Education and Science*, 39(174), 33–38. <https://doi.org/10.15390/EB.2014.341>
- Cao, F., Wang, L., Zheng, R., Guo, L., Chen, Y., & Qian, X. (2022). Research and progress of chemical depolymerization of waste PET and high-value application of its depolymerization products. In *RSC Advances*, 12(49), pp. 31564–31576. <https://doi.org/10.1039/d2ra06499e>
- Choudhury, A. K. R. (2017). Green chemistry and textile industry. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*, 2(3), 351–361. <https://doi.org/10.15406/jteft.2017.02.00056>
- Diao, J., Hu, Y., Tian, Y., Diao, J., Hu, Y., Tian, Y., Carr, R., & Moon, T. S. (2023). Upcycling of poly (ethylene terephthalate) to produce high-value bio-products. *Cell Reports*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.celrep.2022.111908>
- Engler, R. E. (2012). The complex interaction between marine debris and toxic chemicals in the ocean. In *Environmental Science and Technology*, 46(22), pp. 12302–12315). <https://doi.org/10.1021/es3027105>
- Ghosal, K., & Nayak, C. (2022). Recent advances in chemical recycling of polyethylene terephthalate waste into value added products for sustainable coating solutions-hope vs. hype. In *Materials Advances*, 3(4), pp. 1974–1992. <https://doi.org/10.1039/d1ma01112j>
- Graham, R., Erickson, E., Brizendine, R. K., Beckham, T., Mcgeehan, J. E., Pickford, A. R., Graham, R., Erickson, E., Brizendine, R. K., Salvachu, D., & Michener, W. E. (2022). Article The role of binding modules in enzymatic poly (ethylene terephthalate) hydrolysis at high-solids loadings The role of binding modules in enzymatic poly (ethylene terephthalate) hydrolysis at high-solids loadings. *Chem Catalysis*, 2644–2657.
- Hannah Ritchie, Max Roser and Pablo Rosado (2020) - “Renewable Energy” Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: <https://ourworldindata.org/renewable-energy> [Online Resource]
- Haryanti, S., Ganefati, S. P., & Muryani, S. (2023). The social capital and impact in waste management of the waste bank system in Yogyakarta. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 24(2), 190–199.
- Joseph, T. M., Azat, S., Ahmadi, Z., Moini, O., & Thomas, S. (2024). Case Studies in Chemical and Environmental Engineering Polyethylene terephthalate (PET) recycling : A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.cescee.2024.100673>
- Kijo-Kleczkowska, A., & Gnatowski, A. (2022). Recycling of PlasticWaste, with Particular Emphasis on Thermal Methods—Review. *Energies*, 15(6). <https://doi.org/10.3390/en15062114>
- Kumar, S., Panda, A. K., & Singh, R. K. (2011). A review on tertiary recycling of high-density polyethylene to fuel. In *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11),

- pp. 893–910).
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.005>
- Kurowska-Susdorf, A.; Zwierdzki, M.; Bevanda, A.M.; Talić, S.; Ivanković, A.; Płotka-Wasyłka, J. Green analytical chemistry: Social dimension and teaching. *TrAC-Trends Anal. Chem.* 2019, 111, 185–196.
- Larson, A., O'Brien, K., & Anderson, A. (2021). Shaw Industries: Sustainable Business, Entrepreneurial Innovation, and Green Chemistry. *SSRN Electronic Journal*, 1–17.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.1278403>
- Lee, Y., Andrew Lin, K. Y., Kwon, E. E., & Lee, J. (2019). Renewable routes to monomeric precursors of nylon 66 and nylon 6 from food waste. In *Journal of Cleaner Production*, 227, pp. 624–633).
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.194>
- Lozano-González, M. J., González, G., Teresa Rodríguez-Hernández, M. A., González-De, E. A., Santos, L., & Villalpando-Olmos, J. (2000). Physical-mechanical properties and morphological study on nylon-6 recycling by injection molding. In *J Appl Polym Sci* (Vol. 76).
- Maitlo, G., Ali, I., Maitlo, H. A., Ali, S., Unar, I. N., Ahmad, M. B., Bhutto, D. K., Karmani, R. K., Naich, S. ur R., Sajjad, R. U., Ali, S., & Afridi, M. N. (2022). Plastic Waste Recycling, Applications, and Future Prospects for a Sustainable Environment. *Sustainability (Switzerland)*, 14(18).
<https://doi.org/10.3390/su14181637>
- Mitarlis, Ibnu, S., Rahayu, S., & Sutrisno. (2017). Environmental literacy with green chemistry oriented in 21st century learning. *AIP Conference Proceedings*, 1911(1).
<https://doi.org/10.1063/1.5016013>
- Ncube, A., Mtetwa, S., Bukhari, M., Fiorentino, G., & Passaro, R. (2023). Circular Economy and Green Chemistry: The Need for Radical Innovative Approaches in the Design for New Products. *Energies*, 16(4), 1–21.
<https://doi.org/10.3390/en16041752>
- Patti, A., Cicala, G., & Acierno, D. (2021). Eco-sustainability of the textile production: Waste recovery and current recycling in the composites world. *Polymers*, 13(1), 1–22. <https://doi.org/10.3390/polym13010134>
- Perosa, A., Gonella, F., & Spagnolo, S. (2019). Systems thinking: Adopting an emergy perspective as a tool for teaching green chemistry. *Journal of Chemical Education*, 96(12), 2784–2793.
<https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00377>
- Putra, H. P., & Yuriandala, Y. (2010). Studi Pemanfaatan Sampah Plastik Menjadi Produk dan Jasa Kreatif. *Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan*, 2(1), 21–31.
<https://doi.org/10.20885/jstl.vol2.iss1.art3>
- Rietzler, B., Manian, A. P., Rhomberg, D., Bechtold, T., & Pham, T. (2021). Investigation of the decomplexation of polyamide/CaCl₂ complex toward a green, nondestructive recovery of polyamide from textile waste. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(40).
<https://doi.org/10.1002/app.51170>
- Sarian, A. K., Handermann, A. C., Alan Davis, E., & Adhya, A. (1996). *United States Patent* (19).
- Seval, U. (2021). The bursting strength properties of knitted fabrics containing recycled polyester fiber. *Journal of the Textile Institute*, 112(12), 1998–2003.
<https://doi.org/10.1080/00405000.2020.1862490>
- Sheel, A., & Pant, D. (2019). Chemical Depolymerization of PET Bottles via Glycolysis. In *Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles*. Elsevier Inc.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811361-5.00004-3>
- Sheldon, R. A., & Norton, M. (2020). Green chemistry and the plastic pollution challenge: Towards a circular economy. *Green Chemistry*, 22(19), 6310–6322.
<https://doi.org/10.1039/d0gc02630a>
- Stefandl R. (2000). *Improved process for recycling and recovery of purified Nylon Polymer*. (Patent No. WO0029463)
- Subha Pradha, S., & Saranya, K. (2023). Recycling Plastic Waste into Construction Materials for Sustainability. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1210(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1210/1/012016>
- Teti J. (1972). *Process for polymer recovery*. (Patent No. US3696058).
- Tonsi, G., Maesani, C., Alini, S., Ortenzi, M. A., & Pirola, C. (2023). Nylon recycling processes: a Brief Overview. *Chemical Engineering Transactions*, 100, 727–732.
<https://doi.org/10.3303/CET23100122>
- Valenzuela-Ortega, M., Sutor, J. T., White, M. F. M., Hinchcliffe, T., & Wallace, S. (2023). Microbial upcycling of waste PET to adipic acid. *ACS Central Science*, 9(11), 2057–2063.
<https://doi.org/10.1021/acscentsci.3c00414>
- Werner, A. Z., Clare, R., Mand, T. D., Pardo, I., Ramirez, K. J., Haugen, S. J., Bratti, F., Dexter, G. N., Elmore, J. R., Huenemann, J. D., Peabody, G. L., Johnson, C. W., Rorrer, N. A., Salvachúa, D., Guss, A. M., & Beckham, G. T. (2021). Tandem chemical deconstruction and biological upcycling of poly (ethylene terephthalate) to β-ketoadipic acid by *Pseudomonas putida* KT2440. *Metabolic Engineering*, 67, 250–261.
<https://doi.org/10.1016/j.ymben.2021.07.005>