



# Potensi Biodegradasi Plastik PET (*Polyethylene Terephthalate*) Menggunakan Mikroorganisme Tanah TPA dengan Metode Kolom Winogradsky

Amanda Nurifa<sup>1\*</sup>, Diska Ariani Silalahi<sup>1</sup>, Muhammad Ilham<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Kimia, Universitas Negeri Jakarta, Indonesia*

## CONTACT

amandanurifa3@gmail.com

## KEYWORDS

Biodegradasi, Mikroorganisme, Polyethylene Terephthalate

Received: 29/09/2025

Revised: 11/12/2025

Accepted: 20/12/2025

Online: 22/12/2025

Published: 22/12/2025

Risenologi is licenced under a [Creative Commons Attribution 4.0 International Public Licence](#) (CC-BY 4.0)

## ABSTRACT

*Polyethylene terephthalate (PET) is one of the most prevalent pollutants in the environment. Various degradation methods have been developed, yet most still result in carbon emissions. This study aims to investigate the potential of landfill soil microorganisms in degrading PET through the Winogradsky column system. The research was conducted experimentally with a quantitative approach using a Completely Randomized Design (CRD) with one factor, namely the variation in the composition of MSM medium (mL) and landfill soil (grams) at four treatment levels: C0 (control), C1 (600:400), C2 (500:500), and C3 (400:600), each with four replications. The degradation level was analyzed based on the reduction in plastic mass and chemical structural changes using FTIR, while the data were statistically tested with ANOVA and Tukey HSD. The results showed that treatment C2 produced the highest mass reduction (0.196%) after 60 days, whereas FTIR analysis revealed the most significant degradation in C1, indicated by a C–O/C–H ratio of 2.85, an increase in the peak area of C–O–C at 1240 cm<sup>-1</sup> (521.417) and 1095 cm<sup>-1</sup> (457.887), as well as the appearance of a new peak at ~1457 cm<sup>-1</sup> (57.739). ANOVA indicated no significant differences among treatments (p > 0.05). Morphological observations showed that bacterial isolates were dominated by Gram-positive bacilli and chain cocci, consistent with polymer-degrading soil bacteria. The fact that the control (C0) exhibited no mass reduction further confirmed the role of microbes in the degradation process. Variations in MSM and soil composition affected microbial diversity and growth rates, thereby influencing PET degradation levels. Thus, this study demonstrates that landfill soil microorganisms possess the potential to degrade PET, with effectiveness influenced by the composition of the Winogradsky column.*

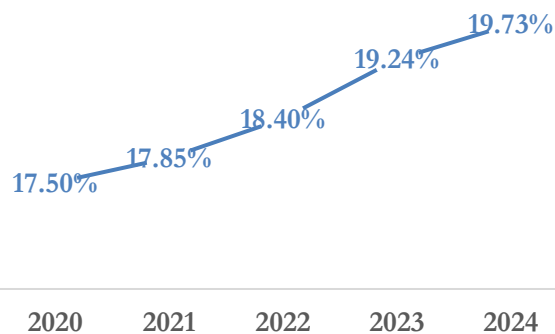
## ABSTRAK

Polyethylene terephthalate merupakan salah satu jenis sampah yang paling banyak mencemari lingkungan. Berbagai metode degradasi telah dikembangkan, namun sebagian besar masih menghasilkan emisi karbon. Penelitian ini bertujuan mengkaji potensi mikroorganisme tanah tempat pembuangan akhir (TPA) dalam mendegradasi PET melalui sistem kolom Winogradsky. Penelitian dilakukan secara eksperimental dengan pendekatan kuantitatif menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) satu faktor, yaitu variasi komposisi media MSM (mL) dan tanah TPA (gram) dengan empat taraf perlakuan: C0 (kontrol), C1 (600:400), C2 (500:500), dan C3 (400:600), masing-masing empat ulangan. Tingkat degradasi dianalisis berdasarkan penurunan massa plastik dan perubahan struktur kimia menggunakan FTIR, sedangkan data dianalisis dengan ANOVA dan uji Tukey HSD. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan C2 memberikan penurunan massa terbesar (0,196%) setelah 60 hari, sementara analisis FTIR memperlihatkan degradasi paling signifikan pada C1 dengan rasio C–O/C–H sebesar 2,85, peningkatan area puncak C–O–C pada 1240 cm<sup>-1</sup> (521,417) dan 1095 cm<sup>-1</sup> (457,887), serta munculnya puncak baru di ~1457 cm<sup>-1</sup> (57,739). Uji ANOVA menunjukkan tidak terdapat perbedaan signifikan antarperlakuan (p > 0,05). Secara morfologis, isolat bakteri didominasi basil dan kokus berantai Gram positif yang konsisten dengan bakteri tanah pendegradasi polimer. Fakta bahwa kontrol (C0) tidak mengalami penurunan massa menegaskan peran mikroba dalam proses degradasi. Variasi komposisi MSM dan tanah berpengaruh terhadap keragaman dan laju pertumbuhan bakteri, sehingga mempengaruhi tingkat degradasi PET. Dengan demikian, penelitian ini menunjukkan bahwa mikroorganisme tanah TPA berpotensi mendegradasi PET dengan efektivitas yang dipengaruhi oleh komposisi kolom Winogradsky.

## PENDAHULUAN

Plastik menjadi salah satu penyumbang utama masalah lingkungan di Indonesia. Data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) melalui portal Sistem Informasi Pengolahan Sampah Nasional (SIPSN) menunjukkan bahwa timbulan sampah plastik terus meningkat dari 15,88% pada tahun 2019 menjadi 19,65% pada tahun 2024. Angka ini setara dengan ±9,9 juta ton per tahun (Putra *et al.*, 2025). Kondisi tersebut menimbulkan

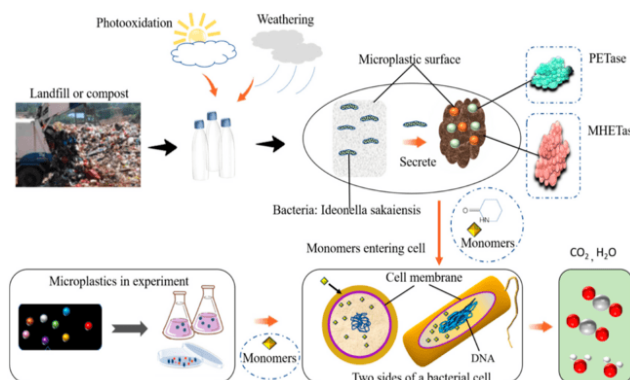
tantangan besar dalam pencapaian target SDGs 12 tentang Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab, khususnya pada aspek pengurangan dan pengelolaan limbah plastik secara berkelanjutan.



Gambar 1. Persentase Sampah Plastik dari Total Sampah Nasional

Salah satu jenis plastik yang paling bermasalah adalah *Polyethylene Terephthalate* (PET). Plastik ini banyak digunakan dalam kemasan makanan dan minuman karena sifatnya yang kuat, bening, dan tahan lama (Nuryati *et al.*, 2021). Namun, ketahanan kimia dan struktur polimernya yang padat membuat PET sangat sulit terurai secara alami, sehingga dapat bertahan ratusan tahun di lingkungan. Upaya penanganan PET selama ini masih mengandalkan metode fisikokimia seperti fotodegradasi (Asriza *et al.*, 2023), pirolisis (Wicaksono & Arijanto, 2017), dan daur ulang mekanik. Sayangnya, metode tersebut memiliki kelemahan, mulai dari kebutuhan energi tinggi, potensi pencemaran, biaya besar, hingga hasil daur ulang yang menurun kualitasnya (Alfian, 2020).

Sebagai alternatif, biodegradasi mulai dilirik sebagai metode ramah lingkungan. Biodegradasi melibatkan aktivitas mikroorganisme, seperti bakteri dan jamur, dalam memecah polimer kompleks menjadi molekul sederhana (Mohanty & Swain, 2017). Sejumlah mikroba diketahui memiliki enzim yang mampu memutus ikatan ester PET, seperti lipase, esterase, kutinase, hingga PETase (Mudondo *et al.*, 2023). Mikroorganisme tersebut umumnya ditemukan pada lingkungan yang terpapar plastik dalam jangka panjang, salah satunya tanah TPA, di mana mikroba sudah beradaptasi dengan kondisi kaya limbah kompleks (Hidayat *et al.*, 2020; Abidin *et al.*, 2023). Beberapa bakteri tanah yang dilaporkan mampu mendegradasi PET antara lain *Bacillus* sp., *Streptomyces* sp., *Pseudomonas* sp., dan *Rhodococcus* sp., serta jamur seperti *Aspergillus niger* dan *Penicillium* sp.

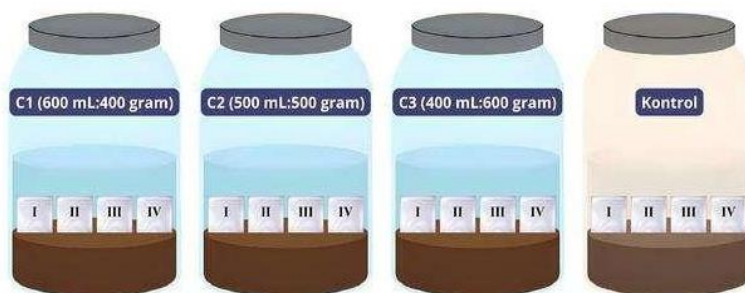


Gambar 2. Skema Biodegradasi Plastik PET oleh Mikroorganisme di Lingkungan TPA dan Eksperimental (Sumber: Cai *et al.*, 2023)

Dalam penelitian ini, tanah TPA rumah tangga dipilih sebagai sumber mikroorganisme untuk menguji potensi biodegradasi plastik PET. Proses pengujian dilakukan menggunakan kolom Winogradsky, yaitu sistem ekosistem mikroba mini yang meniru kondisi alami dengan gradien oksigen dan senyawa kimia (Badriyah & Shovitri, 2015). Kolom ini memungkinkan interaksi mikroba dengan plastik PET secara bertahap dan berlapis, menyerupai kondisi alami di TPA. Dengan demikian, penelitian ini menawarkan pendekatan berbasis ekosistem untuk mengeksplorasi potensi mikroba tanah TPA dalam mendegradasi plastik PET secara berkelanjutan.

## METODE

Penelitian ini menggunakan metode *true experiment* dengan memanfaatkan kolom Winogradsky sebagai sistem uji. Tahapan penelitian diawali dengan pengambilan sampel tanah menggunakan teknik *systematic grid* di lima titik berbeda dengan jarak antar titik  $60 \times 60$  cm pada kedalaman 0,7 m. Kemudian, tanah dikemas secara aseptik dan dibawa ke laboratorium. Sampel plastik PET disiapkan dengan cara dipotong dengan ukuran 8 cm x 2 cm, disterilkan menggunakan etanol dan sinar UV, dikeringkan, serta ditimbang massa kering awalnya. *Mineral Salt Medium* (MSM) terdiri dari garam-garam mineral berupa  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  1,054 g,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  1,55 g,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0,155 g,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0,0103 g, dan  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0,0465 g, yang dilarutkan dalam 1550 mL aquades dan dihomogenkan. pH larutan kemudian disesuaikan hingga  $\pm 6,5$  menggunakan larutan HCl 1% atau NaOH 1%, lalu ditutup, dan disterilisasi dengan autoklaf. Untuk kontrol negatif, sampel tanah juga disterilisasi terlebih dahulu. Adapun kolom Winogradsky dibuat dengan menyiapkan tabung kaca berkapasitas 1000 mL yang diisi sesuai perlakuan seperti pada Gambar 1, dimulai dari lapisan tanah, larutan MSM, dan potongan plastik PET menggunakan peralatan steril (Aziz *et al.*, 2019).



Gambar 3. Perlakuan dalam Kolom Winogradsky

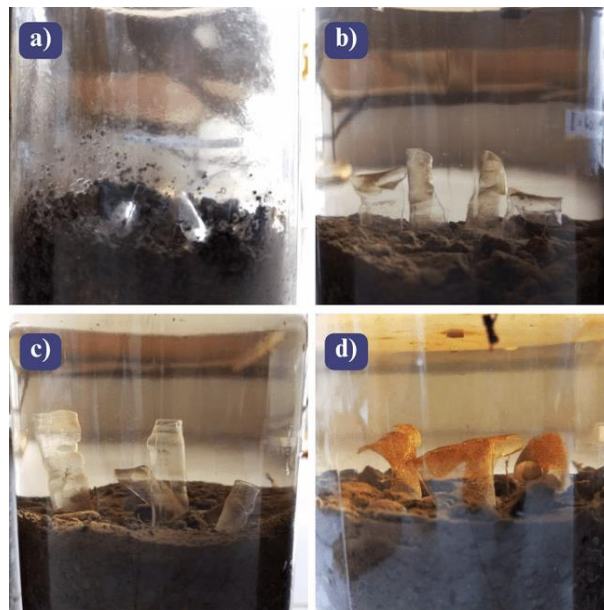
Kolom yang telah disusun kemudian ditutup rapat dan diinkubasi selama 60 hari di suhu ruang. Setelah masa inkubasi berakhir, tingkat degradasi PET dianalisis melalui dua pendekatan. Pertama, pengukuran penurunan massa, yang dilakukan dengan menimbang kembali potongan plastik dengan neraca analitik setelah melalui proses pencucian dengan surfaktan, sterilisasi dengan etanol 96%, pengeringan dengan oven, dan penyimpanan dalam desikator (López *et al.*, 2021; Aziz *et al.*, 2019). Kedua, analisis perubahan struktur kimia, yang dilakukan dengan instrumen FTIR-ATR untuk meninjau pergeseran maupun perubahan intensitas gugus fungsi PET (Asmi *et al.*, 2022). Selain analisis degradasi, dalam penelitian ini juga dilakukan karakterisasi mikroorganisme yang berperan dalam proses tersebut. *Biofilm* pada permukaan plastik diambil secara aseptik dan diinokulasikan ke media *Nutrient Agar* dengan metode gores (Sa'adah, 2020). Koloni bakteri yang tumbuh dipurifikasi untuk mendapatkan isolat tunggal. Karakterisasi dilakukan secara makroskopis dengan mengamati bentuk, tepi, elevasi, ukuran, warna, kejernihan, dan konsistensi koloni, serta secara mikroskopis melalui pewarnaan *methylene blue* dan *KOH string test* untuk penentuan sifat Gram (Rinihapsari & Julianasya, 2021).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Inkubasi Sampel

Inkubasi sampel plastik PET dilakukan dengan metode yang dimodifikasi dari Aziz *et al.* (2019). Plastik PET diinkubasi dalam kolom Winogradsky selama 60 hari untuk diamati tingkat degradasinya. Selama inkubasi, kolom disimpan di tempat hangat dengan paparan cahaya matahari serta sirkulasi udara yang baik, guna mendukung pertumbuhan mikroorganisme dan mengoptimalkan proses degradasi (Sridharan *et al.*, 2021). Pada kondisi ini, PET berperan sebagai satu-satunya sumber karbon utama sehingga hanya mikroorganisme dengan kemampuan mendegradasi polimer kompleks yang dapat bertahan hidup (Cai *et al.*, 2023). Prinsip tersebut memungkinkan terbentuknya seleksi alami, di mana komunitas mikroba yang mampu mensekresikan enzim hidrolitik berkembang lebih dominan dibanding mikroorganisme yang bukan pendegradasi.

Plastik PET yang telah diinkubasi selama 60 hari di dalam kolom Winogradsky diamati visualnya dari luar kolom dan diperoleh hasil seperti Gambar 4. Terjadi pembentukan lapisan pada plastik PET yang diduga adalah *biofilm*, yang menjadi indikasi keberadaan mikroorganisme, khususnya bakteri. *Biofilm* pada plastik PET yang paling banyak terdapat pada kolom C3. Selain itu, terdapat peningkatan kekeruhan (turbiditas) dalam kolom Winogradsky dan terdapat uap air yang mengindikasikan peningkatan biomassa dan juga menjadi ciri adanya aktivitas metabolik mikroorganisme. Namun, kondisi plastik PET yang telah diinkubasi tersebut tidak menunjukkan perubahan, baik warna, tekstur, maupun bentuknya.

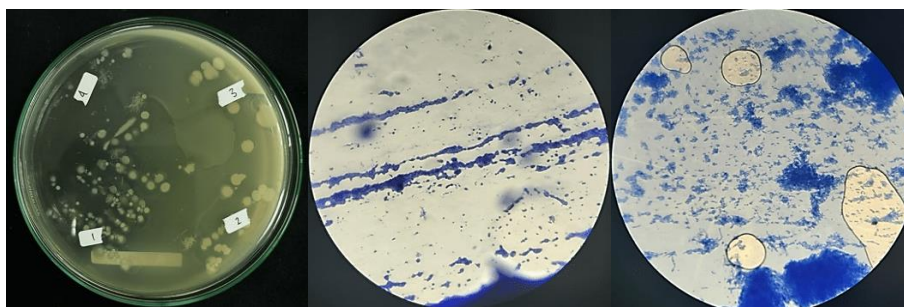


Gambar 4. Kondisi PET Setelah Inkubasi: a) Kolom Kontrol, b) Kolom C1, c) Kolom C2, d) Kolom C3

### Karakterisasi Mikroorganisme

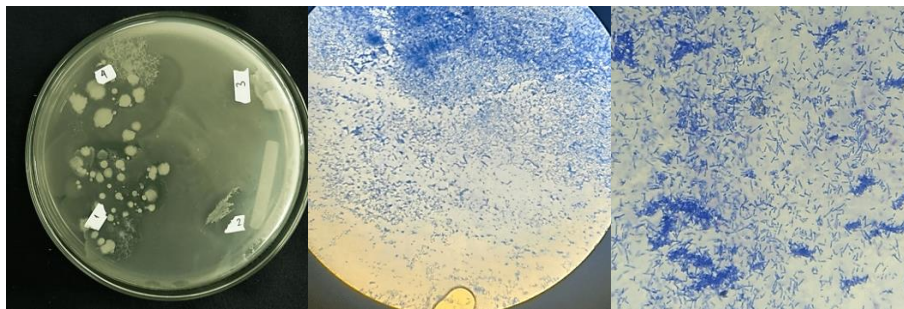
Proses karakterisasi morfologi mikroorganisme diawali dengan pembuatan dan sterilisasi *nutrient agar* (NA) sebagai media pertumbuhan, yang tersusun atas ekstrak daging, pepton, dan agar (Indrayati *et al.*, 2021). Media ini bersifat umum atau non-selektif sehingga mampu mendukung pertumbuhan beragam jenis bakteri maupun jamur (Wahyuni *et al.*, 2024). Kandungan ekstrak daging dan pepton dalam *nutrient agar* berperan sebagai sumber protein, nitrogen, vitamin, serta karbohidrat yang esensial bagi mikroorganisme dalam proses pertumbuhan dan perkembangannya. Sementara itu, agar berfungsi sebagai agen pematid karena sifatnya yang mudah membeku serta mengandung polisakarida galaktan yang relatif sulit diuraikan oleh sebagian besar mikroorganisme (Rinihapsari *et al.*, 2023). Sebelum digunakan, *nutrient agar* diinkubasi kosong terlebih dahulu selama 24 jam untuk memastikan bahwa media benar-benar steril dan bebas dari kontaminan yang dapat mengganggu interpretasi hasil isolasi. Setelah itu, media digunakan untuk isolasi lapisan keruh yang terbentuk di permukaan plastik PET dari kolom Winogradsky setelah inkubasi selama 60 hari.

Hasil karakterisasi koloni menunjukkan bahwa komposisi media MSM dan tanah sangat mempengaruhi keragaman morfologi serta jumlah koloni yang terbentuk. Pada kolom C1 (600 mL MSM : 400 g tanah TPA), terlihat bahwa koloni yang tumbuh dominan berbentuk circular kecil-kecil dengan permukaan halus, berlendir, dan sebagian berkilap. Jumlahnya sangat banyak, yaitu mencapai 67 koloni, menandakan laju pertumbuhan mikroba yang cepat. Hal ini erat kaitannya dengan rasio media, di mana kandungan MSM lebih tinggi dibanding tanah sehingga menyediakan nutrisi terlarut dalam jumlah besar. Kondisi seperti ini mendorong proliferasi bakteri dengan strategi pertumbuhan *r-strategist*, yaitu kelompok mikroba yang memanfaatkan ketersediaan nutrisi melimpah untuk memperbanyak diri dengan cepat (Yin *et al.*, 2022). Secara mikroskopis, isolat dari kolom C1 didominasi kokus berantai (*streptokokus*) dan basil berantai (*streptobasil*) dengan hasil KOH *string test* negatif (Gram positif). Hal ini konsisten dengan genus *Bacillus* dan *Streptococcus* yang dikenal sebagai degrader cepat (*r-strategist*), membentuk koloni kecil padat dengan aktivitas enzimatis tinggi.



Gambar 5. Morfologi Mikroorganisme Kolom C1

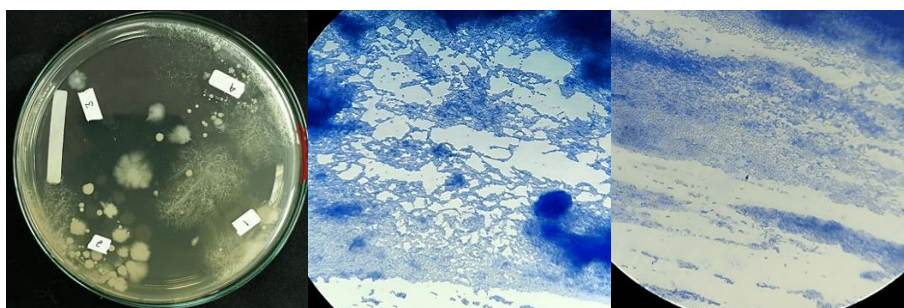
Pada kolom C2 (500 mL MSM : 500 g tanah TPA), jumlah koloni yang tumbuh sebanyak 42 koloni, dengan variasi morfologi yang lebih beragam dibanding kolom C1. Secara makroskopis, koloni berbentuk circular, rhizoid, filamentous hingga myceloid, dengan ukuran bervariasi dari kecil (1 mm) hingga besar (20 mm). Konsistensi koloni dominan berlendir dengan permukaan berkilap, menunjukkan kemampuan adaptasi metabolik yang baik dalam memanfaatkan nutrisi kompleks dari campuran tanah dan MSM. Variasi ukuran koloni yang cukup berbeda menandakan adanya kompetisi antar mikroorganisme, di mana sebagian bakteri tumbuh cepat membentuk koloni kecil (*r-strategist*), sementara sebagian lain mampu mempertahankan pertumbuhan stabil dalam kondisi kompetitif, menghasilkan koloni lebih besar dan tebal (*k-strategist*) (Yin *et al.*, 2022). Secara mikroskopis, isolat dari kolom C2 didominasi basil berantai panjang (streptobasil) dengan hasil KOH *string test* negatif, yang menandakan Gram positif. Karakter ini sesuai dengan kelompok bakteri tanah seperti *Bacillus* dan *Streptomyces*, yang dikenal sebagai pendegradasi polimer kompleks, termasuk plastik (Yang *et al.*, 2023).



Gambar 6. Morfologi Mikroorganisme Kolom C2

Sementara itu, kolom C3 (400 mL MSM : 600 g tanah TPA) memperlihatkan jumlah koloni sebanyak 28. Secara makroskopis, koloni berbentuk circular, irregular, hingga rhizoid, dengan tepi entire, undulate, maupun ramose. Ukuran koloni sangat bervariasi, mulai dari kecil ( $\pm 1$  mm) hingga besar ( $\pm 30$  mm). Permukaan koloni terlihat beragam, dari kering, halus, hingga berlendir, dengan tingkat kejernihan *translucent* hingga *opaque*. Variasi ini menunjukkan bahwa kolom C3 mendukung pertumbuhan mikroba dengan strategi beragam, yakni *r-strategist* dengan koloni kecil yang cepat muncul karena memanfaatkan nutrisi mudah terurai dari MSM, serta *k-strategist* dengan koloni besar dan tumbuh lambat yang lebih adaptif terhadap kondisi nutrisi terbatas dari dominasi tanah pada kolom C3 ini. Kehadiran koloni berbentuk rhizoid menandakan kemampuan beberapa isolat dalam melakukan *swarming* atau pertumbuhan menyebar untuk menjelajah sumber nutrisi yang terbatas (Winkler *et al.*, 2017).

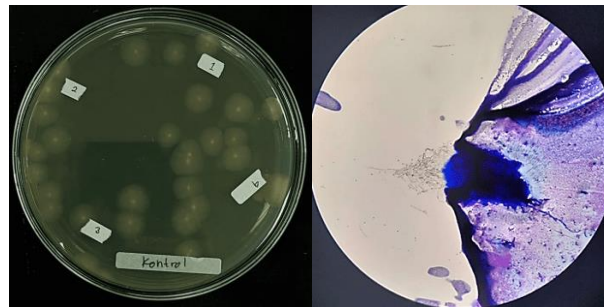
Secara mikroskopis, isolat dari kolom C3 memperlihatkan morfologi basil berantai (streptobasil) dan kokus berantai (streptokokus). Hasil uji KOH menunjukkan negatif (tidak terbentuk *string*), sehingga dapat diidentifikasi sebagai Gram positif. Karakteristik ini sesuai dengan kelompok bakteri tanah seperti *Bacillus* dan *Actinobacteria* (misalnya *Streptomyces*), yang dikenal mampu bertahan pada lingkungan miskin nutrisi sekaligus berperan sebagai pendegradasi polimer kompleks (Aboelkheir *et al.*, 2019).



Gambar 7. Morfologi Mikroorganisme Kolom C3

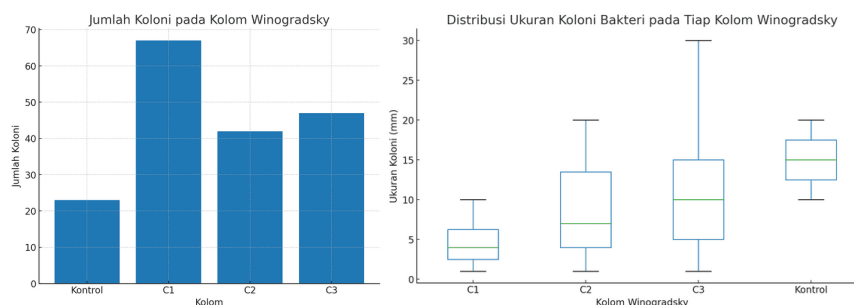
Adapun pada kolom kontrol (C0) dengan tanah yang disterilisasi menggunakan autoklaf, jumlah koloni yang tumbuh relatif sedikit (23 koloni dari 4 kuadran) dengan morfologi seragam berbentuk circular, tepi filiform, elevasi timbul, ukuran besar (10–20 mm), berwarna putih, serta permukaan kering, halus, dan tanpa kilap. Kondisi ini menunjukkan bahwa sterilisasi berhasil menekan keragaman mikroba tanah, sehingga hanya spora atau jamur saprofit yang tahan panas yang dapat bertahan hidup. Ukuran koloni yang relatif besar dan translusen konsisten

dengan karakteristik pertumbuhan jamur saprofit, yang berkembang melalui pembentukan hifa. Secara mikroskopis, hal ini juga didukung oleh ditemukannya struktur menyerupai hifa dan tidak adanya sel bakteri, yang semakin menegaskan dominasi jamur pada kolom kontrol.



Gambar 8. Morfologi Mikroorganisme Kolom C0

Perbedaan fundamental antara kontrol (C0) dan kolom perlakuan (C1–C3) membuktikan bahwa pertumbuhan bakteri pada kolom Winogradsky dipengaruhi langsung oleh perbandingan tanah dan MSM, yang korelasinya dapat dilihat pada Gambar 9. Pada C1 (600 mL MSM : 400 g tanah TPA), tingginya kandungan MSM menyediakan nutrisi melimpah sehingga koloni yang muncul didominasi bentuk circular berukuran kecil, ciri khas bakteri *r-strategist* yang tumbuh cepat saat nutrisi tersedia banyak (Yin *et al.*, 2022). Pada C2 (500 mL MSM : 500 g tanah TPA), rasio seimbang memunculkan komunitas campuran, yaitu *r-strategist* yang memanfaatkan nutrisi terlarut dari MSM dan *k-strategist* yang memanfaatkan senyawa organik kompleks dari tanah, terlihat dari variasi ukuran dan morfologi koloni yang lebih beragam (Yin *et al.*, 2022). Sementara itu, C3 (400 mL MSM : 600 g tanah TPA) dengan dominasi tanah menciptakan kondisi nutrisi terbatas sehingga *k-strategist* lebih unggul, ditandai dengan jumlah koloni lebih sedikit namun ukurannya lebih besar dan pertumbuhannya lambat (Winkler *et al.*, 2017). Sebagai pembandingan, kontrol (C0) dengan tanah bebas bakteri hampir tidak menumbuhkan bakteri, hanya jamur saprofit, sehingga menegaskan bahwa mikroorganisme asli tanah berperan penting dalam kolonisasi (Kim *et al.*, 2023).

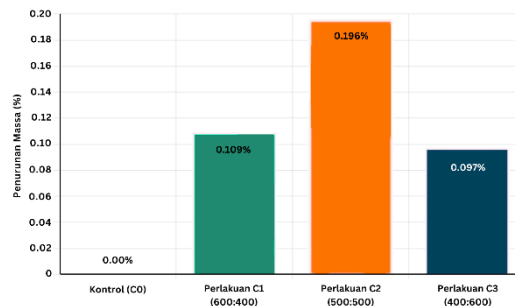


Gambar 9. Grafik Pertumbuhan Bakteri pada Kolom Winogradsky

Selanjutnya, berdasarkan hasil karakterisasi makroskopis dan mikroskopis, isolat mikroorganisme tanah yang ditemukan pada penelitian ini menunjukkan kesesuaian dengan penelitian sebelumnya tentang bakteri pendegradasi plastik. Isolat berbentuk basil dan kokus Gram positif, dengan pola pertumbuhan cepat maupun lambat, selaras dengan penelitian Qi *et al.* (2021) mengenai *Bacillus subtilis* dan *Rhodococcus jostii* sebagai degrader PET. Temuan koloni berfilamen dan rhizoid juga sejalan dengan laporan Rodríguez-Fonseca *et al.* (2022) tentang *Streptomyces* sp. sebagai bakteri pendegradasi polimer. Selain itu, literatur mencatat bakteri lain dengan kemampuan serupa, seperti *Brevibacillus borstelensis*, *Pseudomonas putida* (Brandenberg *et al.*, 2022), serta *Ideonella sakaiensis* (Yoshida *et al.*, 2016). Dengan demikian, keanekaragaman morfologi mikroba tanah pada penelitian ini memperkuat indikasi adanya potensi degradasi plastik oleh isolat mikroorganisme tanah yang diperoleh.

### Analisis Tingkat Degradasi

Penurunan massa plastik PET menjadi parameter kuantitatif untuk membuktikan tingkat degradasi fisik, yang ditentukan dengan mengukur persentase penurunan massanya. Dari proses pengukuran yang dilakukan, data persentase penurunan massa diplot dalam grafik pada Gambar 10.



Gambar 10. Grafik Penurunan Massa Rata-rata PET

Data perhitungan penurunan massa plastik PET pada Gambar 10 menunjukkan bahwa setelah 60 hari inkubasi, ketiga perlakuan kolom Winogradsky (C1, C2, dan C3) menghasilkan penurunan massa yang relatif rendah dengan urutan persentase tertinggi hingga terendah yaitu  $C2 > C1 > C3$ , sedangkan perlakuan kontrol tidak mengalami penurunan massa (0%). Hal ini mengindikasikan bahwa keberadaan konsorsium mikroorganisme tanah TPA yang didukung media nutrisi MSM pada perlakuan C1, C2, dan C3 mampu memicu proses degradasi PET, berbeda dengan kolom kontrol yang hanya berisi tanah tanpa bakteri maupun nutrisi sehingga tidak terjadi degradasi (Kumar *et al.*, 2020). Pendapat ini diperkuat dengan temuan mikroorganisme pendegradasi plastik dari hasil karakterisasi mikroorganisme pada kolom C1, C2, dan C3 yang diduga merupakan genus *Bacillus* dan *Rhodococcus* (Qi *et al.*, 2021). Bakteri-bakteri tersebut dapat menghasilkan enzim-enzim pendegradasi seperti cutinase dan PETase yang terbukti dapat memutus ikatan ester pada rantai panjang polimer PET (Qi *et al.*, 2021). Berbeda halnya dengan perlakuan kontrol, mikroorganisme yang ditemukan adalah jamur saprofit dimana jamur bukanlah mikroorganisme pendegradasi PET karena kurangnya kemampuan dalam menghasilkan enzim pendegradasi (Wei & Zimmermann, 2017; Kumar *et al.*, 2020).

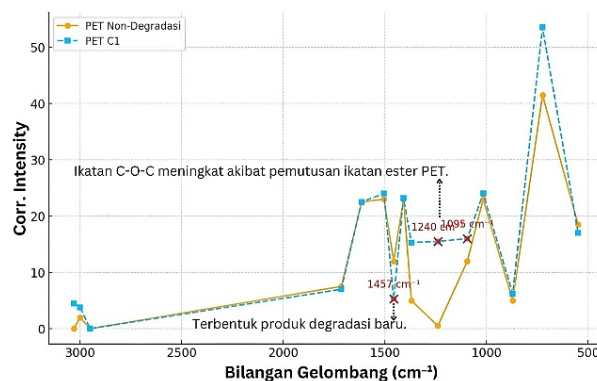
Representasi data pada Gambar 10 juga memberikan informasi bahwa perlakuan C2 memiliki penurunan massa paling signifikan dibandingkan C1 dan C3. Keunikan ini berasal dari keberagaman dan sifat komplementer dari konsorsium mikroba pada kolom C2. Kombinasi bakteri *r-strategist* dan *k-strategist* yang ditemukan pada kolom C2 menghasilkan sinergi yang lebih efisien karena *r-strategist* memulai kolonisasi serta fragmentasi awal rantai PET, sementara *k-strategist* melanjutkan degradasi polimer secara mendalam dan stabil. Sebaliknya, pada kolom C1 yang didominasi bakteri *r-strategist* kurang efektif mendegradasi plastik secara menyeluruh dan pada kolom C3 walaupun didominasi bakteri *k-strategist* kondisi kekurangan nutrisi membuat degradasinya cenderung lambat dan tidak optimal (Yin *et al.*, 2022; Winkler *et al.*, 2017).

Hasil penilaian akhir tingkat penurunan massa PET dan analisis statistik dengan ANOVA belum menunjukkan tingkat degradasi dan perbedaan perlakuan yang signifikan ( $p > 0,05$ ). Kondisi tersebut kemungkinan disebabkan oleh durasi inkubasi yang masih terlalu singkat ( $< 2$  bulan), sehingga aktivitas enzim belum berlangsung cukup lama untuk menghasilkan degradasi yang maksimal dan terukur secara statistik (Huang *et al.*, 2024). Selain itu, berbagai literatur juga melaporkan bahwa PET secara alami membutuhkan waktu ratusan tahun untuk terdegradasi di lingkungan (Sang *et al.*, 2020; Stanica-Ezeanu & Matei, 2021). Tinjauan literatur terdahulu juga memperlihatkan tingkat penurunan massa yang relatif sama seperti hasil yang didapatkan, diantaranya seperti Wei *et al.*, (2022) penurunan massa 0,2 % dan Garcia *et al.*, (2021) penurunan massa 0,35% dengan waktu inkubasi dua bulan. Walaupun demikian, hasil yang didapatkan tetap relevan bahwa mikroorganisme dalam kolom memang berpotensi besar sebagai degrader PET, namun efek nyata terhadap massa plastik baru akan terlihat jika diberikan waktu inkubasi yang lebih panjang, agar proses hidrolisis PET berlangsung lebih optimal.

### Analisis Perubahan Struktur Kimia

Analisis struktur kimia PET setelah inkubasi menggunakan FTIR-ATR (Asmi *et al.*, 2022) menunjukkan perbedaan respons antar perlakuan kolom Winogradsky. Sampel dianalisis pada rentang  $4000-400\text{ cm}^{-1}$  dengan resolusi  $4\text{ cm}^{-1}$  dan 32 scan. Hasilnya memperlihatkan bahwa kolom C1 mengalami degradasi paling intensif, ditandai dengan rasio C–O/C–H tertinggi (2,85), peningkatan signifikan area puncak ester pada  $1240\text{ cm}^{-1}$  (521,417) dan  $1095\text{ cm}^{-1}$  (457,887), serta munculnya puncak baru di  $1457\text{ cm}^{-1}$  (57,739), yang mengindikasikan adanya modifikasi ikatan ester akibat aktivitas enzimatik dan terbentuknya fragmen hasil degradasi (Alzuhairi *et al.*, 2016). C2 juga menunjukkan degradasi dengan rasio cukup tinggi (2,64) dan puncak baru  $1457\text{ cm}^{-1}$ , meskipun intensitasnya lebih rendah dibanding C1. Berbeda dengan itu, C3 menampilkan penurunan tajam area karbonil (C=O) hingga 3,943, yang menandakan fragmentasi rantai polimer akibat pelepasan gugus karbonil (Rostampour

*et al.*, 2024). Kontrol (C0) tetap stabil tanpa perubahan signifikan pada gugus karbonil, ester, maupun aromatik, sehingga spektrum FTIR konsisten dengan PET murni (Kim *et al.*, 2023).



Gambar 11. Perbandingan Spektrum FTIR PET Baru dengan PET C1

Perbedaan utama antara kolom perlakuan (C1–C3) dan kontrol (C0) terletak pada keberadaan mikroorganisme asli tanah TPA. Pada kolom perlakuan, tanah yang tidak disterilisasi memungkinkan bakteri pendegradasi seperti *Bacillus*, *Pseudomonas*, dan *Actinobacteria* (misalnya *Streptomyces*) tumbuh serta berinteraksi langsung dengan permukaan plastik. Mikroorganisme ini menghasilkan enzim seperti esterase yang mampu memutus ikatan ester dalam rantai PET (Qi *et al.*, 2021). Sebaliknya, kolom kontrol yang hanya berisi medium MSM tanpa mikroba aktif tidak memiliki mekanisme biologis untuk memicu degradasi, sehingga struktur kimia PET tetap stabil dan tidak menunjukkan perubahan spektrum FTIR signifikan (Kim *et al.*, 2023).

Tingginya degradasi pada C1 (600 mL MSM : 400 g tanah) dibandingkan C2 dan C3 dapat dijelaskan oleh keseimbangan nutrisi dan populasi mikroba. Komposisi C1 menyediakan medium cair lebih banyak daripada C3, sehingga difusi nutrisi dan oksigen lebih baik, tetapi tetap mempertahankan kepadatan tanah yang cukup untuk mendukung komunitas mikroba beragam. Kondisi ini menciptakan lingkungan optimal bagi mikroba *r-strategist* yang cepat tumbuh maupun *k-strategist* yang lebih tahan lama, sehingga degradasi PET berlangsung lebih intensif (Yin *et al.*, 2022). Sebaliknya, C2 (500:500) relatif seimbang namun tidak seefisien C1 dalam mendukung metabolisme mikroba, sementara C3 (400:600) yang lebih dominan tanah menghasilkan kondisi miskin nutrisi cair, membuat pertumbuhan mikroba melambat dan degradasi cenderung terjadi melalui fragmentasi alih-alih modifikasi gugus kimia yang mendalam.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa mikroorganisme tanah TPA mampu berasosiasi dengan plastik PET melalui pembentukan *biofilm*, yang menandakan adanya potensi degradasi biologis. Perlakuan C2 (500 mL MSM : 500 g tanah) menghasilkan penurunan massa terbesar sebesar 0,196%, sedangkan perlakuan C1 (600 mL MSM : 400 g tanah) menunjukkan perubahan struktur kimia paling jelas berdasarkan analisis FTIR, terutama pada ikatan ester PET. Karakterisasi morfologi mikroba menunjukkan dominasi bakteri Gram positif berbentuk basil dan kokus berantai, dengan kemiripan terhadap genus *Bacillus*, *Streptomyces*, dan *Rhodococcus* yang dikenal sebagai pendegradasi polimer. Meskipun demikian, uji ANOVA menunjukkan bahwa perbedaan antarperlakuan tidak signifikan ( $p > 0,05$ ), sehingga efektivitas degradasi PET pada masa inkubasi 60 hari masih tergolong rendah.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Kelompok Peneliti Muda atas dukungan pendanaan yang telah diberikan, sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

## REFERENSI

- Abidin, N., Wahdaniar, W., Febrianti, N., & Syarifah, S. M. (2023). Pengurai sampah plastik ramah lingkungan. *Bincang Sains dan Teknologi (BST)*, 2(2), 63–71.
- Aboelkheir, M. G., Bedor, P. B., Leite, S. G., Pal, K., Filho, R. D. T., & de Souza Jr., F. G. (2019). Biodegradation of vulcanized SBR: A comparison between *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas aeruginosa* and *Streptomyces* sp. *Scientific Reports*, 9, 19304. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55796-0>
- Alfian, Y. (2020). Pengembangan campuran komposisi bahan baku pada perusahaan daur ulang plastik berjenis PVC PT. RJM. *Jurnal Titra*, 8(2), 161–168.

- Alzuhairi, M. A. H. (2016). Chemical recycling of polyethylene terephthalate (PET) as additive for asphalt. *ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences*, 28(2), 675. <https://doi.org/10.21271/ZJPAS.28.2.28>
- Asriza, R. O., Nurhadini, N., Azizah, Q. N., & Narulita, A. (2023). Analisis sifat mekanik dan permukaan pada degradasi plastik konvensional. *Jurnal Riset Fisika Indonesia*, 4(1), 25–29.
- Aziz, I. R., Muthiadin, C., & Hafsan, H. (2019). Biodegradasi plastik LDPE hitam dan putih pada sampah TPA Antang dalam kolom Winogradsky. *Al-Kaunyah: Jurnal Biologi*, 12(2), 164–170.
- Brandenberg, O. F., Schubert, O. T., & Kruglyak, L. (2022). Towards synthetic PETtrophy: Engineering *Pseudomonas putida* for concurrent polyethylene terephthalate (PET) monomer metabolism and PET hydrolase expression. *Microbial Cell Factories*, 21(1), 119. <https://doi.org/10.1186/s12934-022-01848-y>
- Cai, Z., Li, M., Zhu, Z., Wang, X., Huang, Y., Li, T., & Gong, H. (2023). Biological degradation of plastics and microplastics: A recent perspective on associated mechanisms and influencing factors. *Microorganisms*, 11(7), 1661. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11071661>
- Garcia, J.M., Rodrigues, F.T. and Silva, A.S. (2021). Screening of plastic-degrading microorganisms from contaminated soil and their potential application. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), p. 105827.
- Hidayat, T. R., Indrawati, I., & Herlina, T. (2020). Isolasi dan identifikasi bakteri pendegradasi styrofoam asal tanah tempat pembuangan akhir Sarimukti Bandung. *Quagga: Jurnal Pendidikan dan Biologi*, 12(2), 110–116.
- Huang, Q-S., Yan, Z-F., Liu, J., Wu, Y-Q., Lin, B., Zhang, Y-Q., Chen, G-Q. and Wu, L-P. (2024). Enhanced degradation of polyethylene terephthalate (PET) microplastics by an engineered *Stenotrophomonas pavanii* in the presence of biofilm. *Science of The Total Environment*, 955, p. 177129.
- Indrayati, S., Utami, P. R., & Oktaviani, I. R. (2021). Pemanfaatan serbuk kacang kedelai (*Glycine max* L. Merr) sebagai bahan pengganti beef extract pada media nutrisi agar (NA) untuk pertumbuhan bakteri *Staphylococcus aureus*. *Prosiding Seminar Kesehatan Perintis*, 4(2), 74–79.
- Kim, J.-H., Lee, S.-H., Lee, B.-M., Son, K.-H., & Park, H.-Y. (2023). Biodegradation potential of polyethylene terephthalate by the two insect gut symbionts *Xanthomonas* sp. HY-74 and *Bacillus* sp. HY-75. *Polymers*, 15, 3546. <https://doi.org/10.3390/polym15173546>
- Kumar, G. A., Sudharsan, S., Priyadarshini, K., Kavitha, R., Ramesh, S., & Dutta, K. (2020). Microbial degradation of polyesters: A review on extracellular poly(hydroxyalkanoate) depolymerases. *Polymer Degradation and Stability*, 181, 109364. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109364>
- Mudondo, J., Lee, H.-S., Jeong, Y., Kim, T. H., Kim, S., Sung, B. H., Park, S.-H., Park, K., Cha, H. G., Yeon, Y. J., & Kim, H. T. (2023). Recent advances in the chemobiological upcycling of polyethylene terephthalate (PET) into value-added chemicals. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 33(1), 1–14. <https://doi.org/10.4014/jmb.2210.10006>
- Nuryati, N., Ningsih, Y., Huzairi, H., & Irawan, C. (2021). Karakterisasi fisik komposit plastik polyethylene terephthalate (PET) berbasis serat alam daun pandan laut (*Pandanus tectorius*) dan aplikasinya sebagai bahan baku casing pada produk elektronik. *Buletin Profesi Insinyur*, 4(2), 58–61.
- Putra, M. N. A., Zahrani, N. A., Zahra, T. A., Bella, B. C., Hariyadi, A. G., Fadhila, D. S., Abiyu, S. A. A., Firdausi, R. R. K., Justico, M. N., Albar, A. K., & Firmansyah, P. (2025). Sampah plastik sebagai ancaman terhadap lingkungan. *Aktivisme: Jurnal Ilmu Pendidikan, Politik dan Sosial Indonesia*, 2(1), 154–165.
- Qi, X., Ma, Y., Chang, H., Li, B., Ding, M., & Yuan, Y. (2021). Evaluation of PET degradation using artificial microbial consortia. *Frontiers in Microbiology*, 12, 778828. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.778828>
- Rinihapsari, E., & Julianasya, S. (2023). Penggunaan KOH string test sebagai alternatif identifikasi awal bakteri gram negatif. *Jurnal Riset Ilmu Kesehatan Umum dan Farmasi (JRIKUF)*, 1(4), 102–112.
- Rodriguez-Fonseca, M. F., Sanchez-Suarez, J., Valero, M. F., Ruiz-Balaguera, S., & Diaz, L. E. (2021). *Streptomyces* as potential synthetic polymer degraders: A systematic review. *Bioengineering*, 8(11), 154. <https://doi.org/10.3390/bioengineering8110154>
- Rostampour, S., Cook, R., Jhang, S.-S., Li, Y., Fan, C., & Sung, L.-P. (2024). Changes in the chemical composition of polyethylene terephthalate under UV radiation in various environmental conditions. *Polymers*, 16, 2249. <https://doi.org/10.3390/polym160202249>
- Sa'adah, N. (2020). Bakteri simbiosis akar mangrove *Avicennia* sp. sebagai pendegradasi pewarna tekstil. *Barakuda*, 45, 2(2), 50–55.
- Sang, T., Wallis, C.J., Hill, G. and Britovsek, G.J.P. (2020). Polyethylene terephthalate degradation under natural and accelerated weathering conditions. *European Polymer Journal*, 136, p. 109873.
- Stanica-Ezeanu, D. and Matei, D. (2021). Natural depolymerization of waste poly(ethylene terephthalate) by neutral hydrolysis in marine water. *Scientific Reports*, 11, p. 4431.

- Wahyudi, J., Prayitno, H. T., & Astuti, A. D. (2018). Pemanfaatan limbah plastik sebagai bahan baku pembuatan bahan bakar alternatif. *Jurnal Litbang: Media Informasi Penelitian, Pengembangan dan IPTEK*, 14(1), 58–67.
- Wei, R., & Zimmermann, W. (2017). Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics: how far are we?. *Microbial Biotechnology*, 10(6), pp. 1308–1322.
- Wei, R., Song, C., Gräning, D., Schneider, T., Bielytskyi, P., Böttcher, D., Matysik, J., Bornscheuer, U.T. and Zimmermann, W. (2022). Conformational fitting in the functional evolution of Ideonella sakaiensis PETase. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(42), p. e2209539119.
- Wicaksono, M. A., & Ariyanto, A. (2017). Pengolahan sampah plastik jenis PET (polyethylene terephthalate) menggunakan metode pirolisis menjadi bahan bakar alternatif. *Jurnal Teknik Mesin Undip*, 5(1), 9–15.
- Winkler, M.-K. H., Boets, P., Hahne, B., Goethals, P., & Volcke, E. I. P. (2017). Effect of the dilution rate on microbial competition: r-strategist can win over k-strategist at low substrate concentration. *PLoS ONE*, 12(3), e0172785. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172785>
- Yang, X.-G., Wen, P.-P., Yang, Y.-F., Jia, P.-P., Li, W.-G., & Pei, D.-S. (2023). Plastic biodegradation by in vitro environmental microorganisms and in vivo gut microorganisms of insects. *Microbiol*, 13, 1001750. <https://doi.org/10.1016/j.microbiol.2023.1001750>
- Yang, Z., Wu, Z., Liao, Y., Liu, F., Zhang, W., & Zhong, H. (2023). Understanding the spatial heterogeneity of microbial community in a full-scale landfill leachate treatment plant using advanced 16S rRNA gene sequencing. *Bioresource Technology*, 387, 129607. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129607>
- Yin, Q., Sun, Y., Li, B., Feng, Z., & Wu, G. (2022). The r/K selection theory and its application in biological wastewater treatment processes. *Science of the Total Environment*, 824, 153836. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153836>
- Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., Toyohara, K., Miyamoto, K., Kimura, Y., & Oda, K. (2016). A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science*, 351(6278), 1196–1199. <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>