

Potensi Bioremediasi Plastik Polietilena Tereftalat (PET) (Bioremediation Potential of Polyethylene Terephthalate (PET) Plastics)

KHALIDA KHALIL¹, WAN SYAIDATUL AQMA^{1*}, NAZLINA HAIZA MOHD YASIN¹, MOHAMAD YUSOF MASKAT² & ISHAK AHMAD³

¹*Jabatan Sains Biologi dan Bioteknologi, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia*

²*Jabatan Sains Makanan, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia*

³*Jabatan Sains Kimia, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia*

Diserahkan: 26 Februari 2022/Diterima: 17 Mei 2022

ABSTRAK

Penghasilan plastik yang mesra ekonomi dan kepelbagaian penggunaannya menyebabkan permintaan terhadap plastik meningkat setiap tahun. Antaranya adalah plastik jenis polietilena tereftalat (PET) yang dihasilkan melalui pemolimeran dua monomer iaitu asid tereftalik (TPA) dan etilena glikol (EG). PET menjadi pilihan dalam produk pembungkusan makanan dan minuman kerana cirinya yang tahan haba, tahan lama, mudah dibentuk dan ringan serta kos penghasilan yang murah. Walau bagaimanapun, hal ini telah menjadikan PET sebagai pencemar alam sekitar kerana penggunaannya berjangka pendek dan pakai buang, serta sukar untuk dicurahkan semula jadi dan dikitar semula. PET juga berupaya menjadi mendakan kerana mempunyai kehabluran dan ketumpatan yang tinggi seterusnya menghasilkan mikroplastik bersaiz <5 mm yang berpotensi menjadi ancaman kepada rantai makanan. Kaedah bioremediasi antara salah satu alternatif yang boleh dilaksanakan dalam menangani masalah lambakan bahan buangan plastik PET. Justeru, ulasan ini akan membincangkan empat pendekatan bioremediasi dengan penggunaan bakteria sebagai agen biopencurair PET melalui penggunaan (1) bakteria penghasil biofilem, (2) biosurfaktan, (3) biotinjauan secara pendekatan biologi molekul dan (4) aplikasi bio-pembawa yang boleh dilaksanakan dalam menguraikan bahan buangan PET.

Kata kunci: Asid tereftalik (TPA); biofilem; biosurfaktan; bio-pembawa; etilena glikol (EG)

ABSTRACT

The production of economically friendly plastics and their diversity of uses cause the demand for plastics to increase every year. Among them are polyethylene terephthalate (PET) type plastics produced through the polymerization of two monomers, namely terephthalic acid (TPA) and ethylene glycol (EG). PET is the choice in food and beverage packaging products because of its heat-resistant, durable, easy-to-mold and lightweight features as well as low production costs. However, this has made PET an environmental pollutant due to its short-term use and disposable, as well as the difficulty to decompose naturally and recycled. PET is also capable to precipitate due to its high crystallinity and density which in turn produced microplastics of size <5 mm which are potentially a threat to the food chain. Bioremediation methods are among the alternatives that can be implemented in dealing with the problem of PET plastic waste abundance. Thus, this review will discuss four bioremediation approaches with the use of bacteria as PET biodegrader using (1) biofilms producing bacteria, (2) biosurfactants, (3) molecular biology approach and (4) feasible bio-carrier applications in decompose PET waste.

Keywords: Biofilms; biosurfactant; bio-carrier; ethylene glycol (EG); terephthalic acid (TPA)

PENGENALAN

Plastik yang dihasilkan untuk kegunaan jangka pendek atau pakai buang telah menyebabkan lambakan bahan buangan

plastik setiap hari (Miandad et al. 2019). Pelupusan yang sedia ada dan tidak berhemah oleh sesetengah individu telah menyebabkan bahan buangan plastik menjadi salah

satu sumber pencemaran di daratan mahupun akuatik (Auta et al. 2017b; Geyer et al. 2017). Apabila bahan buangan plastik mencemari alam sekitar, ia berupaya untuk membentuk mikroplastik, iaitu plastik yang mengalami penguraian kepada serpihan yang lebih kecil (mikroplastik sekunder) disebabkan oleh pelbagai faktor seperti fotooksida melalui pendedahan kepada cahaya matahari (Webb et al. 2013). Tambahan pula, penggunaan mikroplastik yang digunakan dalam saiz mikro (mikroplastik primer) sebagai salah satu ramuan dalam produk seperti ubat gigi dan sabun pencuci muka juga menyebabkan peningkatan pencemaran mikroplastik (Essel et al. 2015; Leslie 2014; Sarijan et al. 2019). Disebabkan saiznya yang sangat kecil membolehkan ia melepasi tapisan dari loji rawatan air kumbahan lalu menyebabkan pencemaran alam sekitar yang mengancam hidupan akuatik serta keselamatan sumber makanan serta kesihatan manusia sejagat (Suardy et al. 2020).

Kaedah bioremediasi dalam aspek biodegradasi oleh bakteria pencurai plastik boleh diaplikasikan dalam menangani masalah ini. Ulasan ini menekankan aspek bioremediasi bahan buangan PET menggunakan bakteria sebagai agen biodegradasi melalui empat pendekatan iaitu bakteria penghasil biofilem, penggunaan (bio)surfaktan, biotinjauan secara pendekatan biologi molekul serta penggunaan biopembawa sebagai agen bioremediasi.

MIKROPLASTIK

Mikroplastik telah dilaporkan tersebar di persekitaran seperti di daratan (tanah di pusat pelupusan bahan buangan plastik) serta sungai dan laut melalui aliran langsung domestik ataupun industri. Antara impak negatif mikroplastik adalah ia boleh berfungsi sebagai agen penyebaran atau vektor kepada pelbagai pencemar seperti logam berat, mikroorganisma patogen, serta bahan kimia berbahaya (Amelia et al. 2021; Chen et al. 2021; Hwi et al. 2020). Mikroplastik yang tersebar di persekitaran boleh berinteraksi dengan bahan pencemar tidak organik seperti logam berat antaranya aluminium, kadmium, kuprum, besi dan zink (Amelia et al. 2021; Rochman et al. 2014). Tiga mekanisme yang berlaku apabila terdapatnya interaksi mikroplastik dan logam berat di persekitaran iaitu (1) penyerapan logam berat melalui penjerapan secara langsung dari kompleks kation ke kawasan bercas atau neutral di permukaan mikroplastik, (2) berlakunya pemendakan bersama dan (3) penjerapan pada oksida hidrat (Ashton et al. 2010). Manakala, mikroplastik boleh mengandungi logam berat semasa proses penghasilan plastik menggunakan bahan

tambahan; penstabil haba akan dicampurkan supaya ia tidak mudah rosak apabila terdedah kepada suhu yang tinggi. Walau bagaimanapun, ia boleh mengandungi logam berat seperti zink dan kadmium yang berbahaya kepada organisma (Hahladakis et al. 2018). Penjerapan logam berat pada mikroplastik boleh menyebabkan pengumpulan bahan toksik di persekitaran terutamanya di kawasan akuatik seperti sungai dan laut yang menjadi habitat kepada sumber makanan (Rochman et al. 2014). Seterusnya, mikroplastik boleh bertindak sebagai vektor kepada mikroorganisma patogen (Zettler et al. 2013). Mikroplastik-mikroorganisma patogen yang tersebar di kawasan akuatik boleh menjadi sumber makanan kepada hidupan akuatik (Bowley et al. 2021; Patria et al. 2020; Wagner et al. 2014). Mikroplastik yang mencemari sistem akuatik boleh memasuki rantai makanan bermula daripada pengguna primer iaitu zooplankton sehingga kepada ikan mahupun dimakan oleh pemakan penuras seperti kerang dan kupang (Leslie et al. 2014; Wagner et al. 2014). Zooplankton telah dilaporkan mampu untuk memakan mikroplastik melalui cara pemakanan penurasan apabila mikroplastik dibekalkan di dalam kawasan tersebut untuk menilai kebolehan zooplankton mencapai mikroplastik sebagai sumber makanan. Kajian mendapati sebanyak 13 daripada 15 zooplankton mampu memakan mikroplastik bentuk manik mikro bersaiz 7.3-30.6 μm (Cole et al. 2011). Hal ini bermakna, sekiranya mikroorganisma patogen hadir pada permukaan mikroplastik, ia akan dimakan secara keseluruhannya dan akan tersebar dalam rantaian makanan seterusnya kepada pengguna terakhir iaitu manusia.

Mikroplastik ditakrifkan sebagai plastik yang mempunyai saiz kurang daripada 5 mm, hadir dalam pelbagai bentuk, saiz dan komposisi polimer (Issac & Kandasubramanian 2021). Mikroplastik mempunyai kepelbagaian ketumpatan bergantung kepada jenis dan bentuk mikroplastik. Sebagai contoh, mikroplastik bentuk fiber (polietilena dan polistirena) boleh kekal terapung di permukaan air disebabkan ketumpatannya yang rendah manakala serpihan mahupun manik mikro (poliester dan PVC) mempunyai ketumpatan yang tinggi dan akan tenggelam ke dasar air (Cole et al. 2011; Patria et al. 2020). Mikroplastik terbahagi kepada dua iaitu mikroplastik primer dan sekunder (Auta et al. 2017a).

Mikroplastik primer direka dan dihasilkan dalam saiz kecil (lebih kurang 1 mm) seperti granul dan manik mikro (Essel et al. 2015). Melalui kemajuan teknologi dan inovasi, mikroplastik primer telah diguna pakai dalam industri mahupun kegunaan

domestik yang memerlukan plastik dalam bentuk mikro (Auta et al. 2017a). Kepelbagaian fungsi, saiz dan bentuk mikroplastik primer telah menyebabkan ia menjadi pilihan dalam menghasilkan produk (Leslie 2014). Manakala, mikroplastik sekunder adalah hasil pemecahan dan penguraian plastik makro kepada serpihan kecil (bersaiz kurang daripada 5 mm) (Essel et al. 2015). Mikroplastik sekunder boleh terhasil daripada banyak sumber (Jadual 1). Bahan buangan plastik yang berada di persekitaran dan tidak dilupuskan dengan cara yang betul akan melalui proses fotopencuraian disebabkan pendedahan kepada sinaran lembayung (UV) daripada cahaya matahari lalu menyebabkan pemecahan plastik kepada serpihan (Geyer et al. 2017). Apabila ini berlaku, ia menyebabkan penggabungan kumpulan berfungsi berkait oksigen dengan polimer atau plastik. Proses ini membawa kepada perubahan fizikal terhadap plastik iaitu ia menjadi lebih rapuh dan akan pecah menjadi kepingan yang semakin kecil dan berat molekul juga akan menurun (Andrady 2011).

POLIETILENA TEREFTALAT (PET)

Polietylena tereftalat (PET) merupakan antara jenis plastik yang digunakan secara meluas dalam pelbagai industri selain daripada polipropilin (PP), polietilena (PE) dan polisterina (PS).. Antara penggunaannya adalah dalam industri makanan dan minuman, bahan untuk pembungkusan, fiber, filem, barangan perubatan, pakaian dan tekstil (Ribitsch et al. 2012; Quartinello et al. 2017). PET terbentuk daripada tindak balas pemeluwapan dan pempolimeran dua monomer iaitu tereftalat atau asid tereftalik (TPA) dan etilena glikol (EG) (Rajah 1) (Farzi et al. 2019).

PET merupakan antara polimer yang penting dan telah dihasilkan sebanyak 36 juta tan setahun. PET digunakan secara meluas sebagai poliester termoplastik linear lembut yang telah memasuki pasaran polimer sejak tahun 1977 (Farzi et al. 2019). PET mempunyai pelbagai peratus kehabluran mengikut kepada penggunaannya. Semakin tinggi peratus kehabluran, semakin kukuh dan stabil struktur PET (Kong & Hay 2002). Selain itu, PET digunakan secara meluas dalam pelbagai sektor terutamanya pembungkusan kerana ia mempunyai suhu peralihan kaca (T_g) yang tinggi. T_g merupakan suhu polimer amorf apabila peningkatan mobiliti molekul mengakibatkan perubahan ketara pada sifat terma (Ghatge et al. 2020). Kefleksibelan rantaian poliester akan menurun apabila T_g meningkat (Kawai et al. 2019). Ini menyebabkan polimer PET sangat tahan haba dan tahan lasak. Nilai T_g PET adalah pada 75 hingga 80 °C (Kawai et

al. 2019; Kong & Hay 2002; Salvador et al. 2019). Bahan buangan PET yang berada di kawasan permukaan akuatik akan mengalami kemerosotan akibat pendedahan kepada cahaya matahari dan geseran yang berlaku seperti dipukul ombak menyebabkan pemecahan bahan buangan PET kepada serpihan kecil lalu menghasilkan mikroplastik (Hamid et al. 2018; Issac & Kandasubramanian 2021; Patria et al. 2020).

RAWATAN BAHAN BUANGAN PET

Terdapat dua kaedah pelupusan sedia ada dalam menangani masalah bahan buangan PET iaitu melalui kitar semula secara fizikal dan kimia (Rajah 2). Walau bagaimanapun, kedua-dua pendekatan ini mempunyai kekurangan dalam perlaksanaannya.

Penggunaan PET yang meluas dalam sektor pembungkusan pakai buang seperti plastik pembungkusan makanan, bekas kelengkapan mandian dan botol minuman membolehkan bahan buangan PET dilupuskan bersama sisa domestik (Farzi et al. 2019). Hal ini menyebabkan bahan buangan PET akan berakhir di pusat pelupusan sampah berbanding untuk dijadikan bahan kitar semula (Vague et al. 2019). Laporan menyatakan hanya 30% sahaja bahan buangan PET melalui proses kitar semula dan hanya 20% sahaja digunakan untuk manfaat lain (Taniguchi et al. 2019).

BIOREMEDIASI SEBAGAI ALTERNATIF DALAM MERAWAT PET

Impak negatif yang direkodkan melalui rawatan bahan buangan PET secara kimia dan fizikal memerlukan kaedah alternatif yang lebih selamat dan mesra alam. Antara pendekatan yang boleh dijalankan dalam mengurangkan pencemaran atau melupuskan bahan buangan PET adalah dengan kaedah bioremediasi. Bioremediasi merupakan teknik pengurusan sisa bergantung pada mikroorganisma dan aktiviti biologinya untuk berinteraksi dengan faktor persekitaran dan menyebabkan perubahan keadaan kimia fizikal sisa berbahaya menjadi produk yang kurang toksik atau tidak beracun (Sharma et al. 2017).

Kaedah bioremediasi boleh dicapai dengan menggunakan mikroorganisma sebagai agen biopencuraian (Jadual 2) (Yoshida et al. 2016). Mikroorganisma merupakan organisma oportunistik dan mempunyai keupayaan untuk beradaptasi dengan pelbagai persekitaran. Mereka juga mempamerkan kebolehan untuk menukarkan pelbagai sebatian termasuklah plastik polimer seperti PET kepada monomer asalnya iaitu TPA dan EG. Ciri ini menyebabkan

mikroorganisma dapat menggunakan bahan PET sebagai sumber nutrienya. Hal ini memberikan kelebihan dalam perspektif biopencuraian (Auta et al. 2017b).

Antara pendekatan yang boleh dijalankan dalam cabang bioremediasi adalah biopencuraian bahan buangan PET secara biokatalitik. Penggunaan mikroorganisma secara biokatalitik dapat mengurangkan tenaga kerja dan langkah penulenan enzim serta mengalakkan tindak balas secara berurutan dalam sel mikroorganisma. Enzim yang berfungsi sebagai agen pencuraian dapat dilindungi dalam sel daripada kesan nyahstabil dan penurunan aktiviti disebabkan perubahan suhu mahupun pH semasa rawatan dijalankan. Malah, pendekatan ini dapat dilaksanakan bukan hanya oleh enzim tertentu tetapi pelbagai enzim boleh melakukan tindak balas dalam proses pencuraian plastik dalam mikroorganisma (Gong et al. 2018). Sebagai contoh, *Ideonella sakaiensis* yang dipencilkan oleh Yoshida et al. (2016) mampu mencurai PET dan sebatian perantaraan, mono (2-hidroksietil) asid tereftalik (MHET) secara biokatalitik dengan kehadiran dua enzim hidrolase dalam pencilan tersebut iaitu PETase dan MHETase.

Degradasi plastik oleh mikrob dan/atau enzimatik bermakna (Rajah 3) adalah strategi menyahpolimer sisa plastik kepada monomer untuk dikitar semula atau mineralisasi menjadi karbon dioksida, air dan biojisim baharu, dengan pengeluaran serentak bioproduct bernilai lebih tinggi (Montazer et al. 2020). Biodegradasi plastik melibatkan perembesan enzim ekstrasel oleh mikroorganisma, perlekatan enzim pada permukaan plastik, hidrolisis kepada perantaraan polimer pendek, yang akhirnya diasimilasikan oleh sel mikrob sebagai sumber karbon untuk membebaskan CO₂ (Mohan et al. 2020).

Enzim ekstrasel menyahpolimer polimer kepada monomer atau ikatan pendek yang mampu untuk memasuki sel seterusnya digunakan oleh metabolisme mikroorganisma ekoran pemecahan monomer atau ikatan pendek oleh enzim intrasel (Ghosh et al. 2019). Sebagai contoh, *I. sakaiensis* 201-F6 merembeskan PETase, untuk mencuraikan PET kepada MHET (mono(2-hidroksietil) asid tereftalik) dan TPA. Seterusnya, MHETase yang berada di membran luar 201-F6 menguraikan MHET kepada TPA dan EG. Kemudian, TPA melalui pengangkut TPA (TPATP) akan memasuki sel dan katabolisme TPA dijalankan oleh enzim dioksigenase (TPAD) untuk membentuk protokatekuat (PCA). Selepas itu, PCA akan memasuki kitaran Krebs dan menjana tenaga untuk kegunaan sel (Kamimura & Masai 2014; Yoshida et al. 2016). Dalam *I. sakaiensis* 201-F6, PCA akan memasuki tapak jalan belahan 3,4 sebelum memasuki kitaran Krebs

(Rajah 3) manakala bagi *Comamonas* sp. strain E6, PCA akan melalui tapak jalan belahan 4,5 (Kamimura et al. 2010). Dalam metabolisme monomer EG, kajian lepas melaporkan *Pseudomonas putida* KT2440 akan menukarkan EG kepada glikoaldehyd melalui tindak balas oksidasi yang dimangkin oleh enzim dehidrogenase (PP_0545, PedI, PedE dan PedH) dan metabolit akhir dalam tindak balas ini adalah gliksilat, Gliksilat karboligase akan memetabolismekan gliksilat untuk diturunkan kepada 2-fosfoglisarat seterusnya diturunkan kepada piruvat dan memasuki kitaran Krebs (Li et al. 2020).

Walaupun fakta bahawa plastik ini mewakili bukan semula jadi kimia, beberapa mikroorganisma yang mampu memetabolismekan polimer ini telah dikenal pasti sejak beberapa tahun kebelakangan ini. Lebih 90 mikroorganisma, termasuk bakteria dan kulat, telah diketahui untuk merendahkan plastik berasaskan petroleum (Mohan et al. 2020).

Bakteria Penghasil Biofilem

Biopencuraian mikroplastik PET boleh dilaksanakan menggunakan mikroorganisma penghasil biofilem. Biofilem merupakan kumpulan bakteria yang membentuk koloni sama ada secara planktonik atau melekat pada permukaan yang pelbagai (Aqma & Quilty 2015). Penjanaan biofilem membentuk keadaan yang membantu kelangsungan hidup mikroorganisma di kawasan persekitarannya (Sivadon et al. 2019). Pembentukan biofilem adalah melalui kronologi berikut; (1) sel planktonik akan melekat pada permukaan yang digelar perlekatan permukaan. Semasa fasa ini, perlekatan sel pada permukaan bersifat berbalik dan tidak berbalik. Sekiranya sel mahu bermandiri secara biofilem, perlekatan tidak berbalik akan berlaku dan membawa kepada pembentukan mikrokoloni. Mikrokoloni yang terhasil akan dipertingkatkan dengan penghasilan bahan polimer ekstrasel (EPS) oleh komuniti sel seterusnya membentuk (2) biofilem matang. Setelah itu, sesetengah sel akan melalui fasa penyelerakan untuk bermandiri di permukaan lain dan disifatkan sebagai permulaan kepada pembentukan biofilem baharu (Toyofuku et al. 2016).

Sistem biofilem amat sesuai untuk rawatan sebatian rekalsitran kerana biojisim mikrobnnya yang tinggi dan keupayaan untuk pemegungan sebatian. Bioremediasi juga dipermudahkan oleh pemindahan gen yang dipertingkatkan dalam kalangan organisma biofilem dan oleh peningkatan bioketersediaan bahan pencemar untuk degradasi akibat daripada kemotaksis bakteria. Bioremediasi pengantaraan biofilem memberikan alternatif yang cekap dan lebih selamat kepada bioremediasi kerana sel-sel di dalam

biofilem mempunyai peluang yang lebih baik untuk penyesuaian dan kelangsungan hidup, terutamanya semasa tempoh tekanan kerana ia dilindungi di dalam matriks (Singh et al. 2006).

Cerapan terhadap pertumbuhan bakteria pada pelbagai permukaan mendapati, penghasilan EPS memainkan peranan penting dalam perlekatan biofilem pada permukaan atau di antara satu sel dengan sel yang lain selain menjadi sistem pertahanan biofilem (Abbasnezhad et al. 2011; Gilan et al. 2004; Gutierrez et al. 2013). Kehadiran EPS berkemungkinan menjadi perantara molekul perlekatan terhadap hidrokarbon serta memainkan peranan penting dalam mengasimilasikan nutrien seperti bahan hidrofobik (hidrokarbon atau polimer) sebagai sumber nutrien biofilem (Sivadon et al. 2019). Hal ini membolehkan biopencuraian PET berlaku dengan cekap, berterusan dan berkesan (Abbasnezhad et al. 2011; MarchutMikolajczyk et al. 2018). Selain itu, tahap hidrofobik yang tinggi dari permukaan sel membantu biofilem untuk melekat pada polimer sintetik. Permukaan sel adalah bersifat hidrofilik namun perlekatan selalunya ditingkatkan dengan penambahan kumpulan berfungsi hidrofilik kepada permukaan hidrofobik polimer. Hal ini menyebabkan peningkatan perembesan enzim hidrolitik pada permukaan PET oleh bakteria penghasil biofilem (Carr et al. 2020).

Dalam menggalakkan pembentukan biofilem, pendedahan kepada tekanan seperti kekurangan sumber karbon atau tiada pendedahan sumber karbon kepada kultur biofilem boleh meningkatkan pembentukan biofilem, seterusnya pencuraian PET yang lebih berkesan dapat dijalankan (Sivan et al. 2006). Hal ini kerana, PET telah menjadi sumber nutrien iaitu karbon yang diperlukan dalam kelangsungan hidup dan kemandirian mikroorganisma. Terdapat kajian menunjukkan apabila sel biofilem dihadkan sumber karbon atau tiada pendedahan kepada sumber karbon, permukaan sel akan menjadi lebih hidrofobik dan meningkatkan tahap perlekatan sel. Apabila tahap perlekatan sel dipertingkatkan, kebolehcapaian biofilem kepada polimer juga meningkat seterusnya pencuraian polimer seperti PET dapat dijalankan dengan lebih cekap (Ghosh et al. 2019; Sivadon et al. 2019). Hasil kajian Gilan et al. (2004) mendapati dengan pendedahan *Rhodococcus ruber* C208 kepada medium yang dibekalkan minyak mineral yang terhad bersama filem PE menunjukkan peningkatan biojisim C208 serta pencuraian filem PE yang lebih baik. Selain itu, komuniti biofilem yang melekat pada polimer seperti PET mempunyai kesignifikan dalam proses pencuraian disebabkan ia boleh menjadi tapak perlekatan, kehadiran nutrien yang berterusan,

perkongsian metabolit dan meningkatkan daya maju sel seterusnya meningkatkan dan mempercepatkan proses biopencuraian (Ghosh et al. 2019).

Di samping itu, terdapat dua aplikasi biofilem yang boleh diketengahkan dalam mencuraikan PET iaitu penggunaan mikroorganisma tunggal penghasil biofilem (BT) dan konsortium biofilem (BK). Keduanya mempamerkan kemampuan dalam mencurai PET dengan berkesan. Walau bagaimanapun, pendekatan BK adalah lebih cekap kerana kepelbagaian komuniti dalam biofilem membolehkan pencuraian PET berlaku secara sinergisme antara spesies dalam biofilem (Ghosh et al. 2019; Roberts et al. 2020).

Gao dan Sun (2021) telah mengkaji BT dan BK daripada marin dalam mencurai PET. Berbanding BT, BK telah mempamerkan pencuraian PET yang lebih baik dengan menyebabkan pemecahan filem PET kepada serpihan kecil selepas 14 hari eraman. Lima genera bakteria telah dikenal pasti daripada biofilem yang mengkoloni PET iaitu *Idiomarina*, *Marinobacter*, *Exiguobacterium*, *Halomonas* dan *Ochrobactrum*. Namun tiga genus bakteria sahaja yang mampu mencurai PET iaitu *Exiguobacterium* sp., *Halomonas* sp. dan *Ochrobactrum* sp. dan dijadikan BK CAS6 dan membentuk biofilem pada permukaan PET. Apabila CAS6 dihidupkan di dalam media yang mengandungi PET, PET direkodkan berubah morfologi permukaan dan filem PET yang dirawat CAS6 mempamerkan penurunan kehabluran PET daripada 92.55% kepada 89.85% yang dianalisis menggunakan belauan sinaran X (XRD).

Terdapat juga kajian BK terhadap kepelbagaian pra rawatan terhadap polimer telah dilaksanakan. Han et al. (2020) menjalankan kajian terhadap plastik PE yang dikategorikan kepada tiga; (1) filem PE, (2) filem PE terawat sinaran ultraviolet (WPF) dan (3) PE yang ditanam selama 30 bulan (BPF). Terdapat dua jenis pencilan bakteria iaitu *Arthrobacter* sp. and *Streptomyces* sp. telah dipilih untuk dijadikan BK dalam mencurai PE. Hasil kajian tersebut mendapati BK mampu untuk menurunkan kehidrofobikan filem PE, WPF dan BPF masing-masing sebanyak 5.5%, 6.6% dan 9.3%. Selain itu, penjaan karbon dioksida juga merekodkan bacaan yang tinggi berbanding BK tanpa PE selepas 90 hari eraman dan ini menunjukkan bahawa PE telah digunakan sebagai sumber karbon untuk kelangsungan hidup seterusnya mencuraikan PE.

Biosurfaktan sebagai Agen Pencurai PET

Biosurfaktan merupakan sebatian aktif permukaan yang dihasilkan oleh mikroorganisma. Sebatian ini

adalah mesra alam dan tidak toksik. Biosurfaktan berfungsi sebagai pemangkin dalam kebolehcapaian mikroorganisma terhadap sebatian hidrofobik seperti hidrokarbon dan polimer plastik seterusnya membolehkan pencuraian berlaku dengan lebih berkesan (Jadual 3). Sifat fisiologi mikroorganisma seperti pengeluaran biosurfaktan dapat meningkatkan biokebolehsediaan dan mengaruh degradasi sebatian hidrofobik (Singh et al. 2006). Biosurfaktan boleh bertindak dengan dua cara iaitu mengemulsi fasa bukan akuas bahan cemar atau menyebabkan peningkatan keterlarutan bahan cemar tersebut. Kelebihan ini membolehkan bahan cemar lebih merebak dan rentan terhadap biopencuraian oleh mikroorganisma (Bustamante et al. 2012; MarchutMikolajczyk et al. 2018). Kebolehan biopencuraian berkait biosurfaktan telah dikaji dalam mencurairan pencemaran hidrokarbon. MarchutMikolajczyk et al. (2018) mendapati bakteria endofitik, *Bacillus pumilus* 2A mempamerkan keupayaan mengemulsi minyak enjin sebanyak 65.58% yang dinilai melalui indeks emulsi 24 selama proses biopencuraian yang dijalankan selama 14 hari eraman.

Biosurfaktan juga dihasilkan apabila sumber nutrien yang terhad dikesan oleh mikroorganisma (Abbasnezhad et al. 2011). Dalam strategi rawatan PET, bakteria penghasil biosurfaktan boleh dijadikan agen biopencuraian PET. Biosurfaktan yang dihasilkan dapat membantu bakteria dalam menggunakan PET sebagai sumber karbon selepas tindakan emulsi mahupun pengurangan hidrofobik permukaan PET berlaku. Singh dan Sedhuraman (2015) menyaring aktiviti biosurfaktan *Nocardiosis* sp. mrinalini 9 melalui asai hemolisis, emulsi dan teknik sebaran minyak dan menganggarkan pencuraian PE dan cawan plastik yang diuji berkait dengan kehadiran biosurfaktan dengan mempamerkan pencuraian PE dan cawan plastik masing-masing sebanyak 22% dan 10%. Selain itu, Kavitha dan Bhuvanewari (2021) pula memencilkan biosurfaktan lipopeptida daripada *Bacillus* sp. PE3 dan merekodkan pencuraian PE sebanyak 6.68% selama 30 hari eraman dan mengenal pasti enzim lignolitik, laccase dan lignin peroxidase terlibat dalam pencuraian tersebut.

Pendekatan Biologi Molekul

Dalam menangani masalah pencemaran PET, pendekatan biologi molekul boleh dilaksanakan menggunakan kaedah 1) metagenomik dan 2) biokatalitik. Metagenomik membolehkan penyaringan mikroorganisma atau enzim tertentu dalam menjadi agen pengurai bahan buangan PET. Walaupun kaedah pemencilan terus bakteria

sering dilakukan dalam mengenal pasti kebolehan bakteria tersebut untuk menguraikan PET, namun, hanya 0.1% hingga 1% sahaja spesies bakteria yang boleh dikulturkan. Hal ini disebabkan oleh spesies bakteria boleh dikulturkan adalah terhad, kehadiran bahan perencat, bakteria berada di dalam fasa aktiviti metabolik yang rendah dan kultur berada di dalam suhu, pH dan tekanan yang kurang sesuai untuk pertumbuhan bakteria (Almeida et al. 2020). Melalui kaedah metagenom, bakteria yang mampu menguraikan PET boleh disaring daripada sampel *ex situ*, seumpama kehadiran gen mengekodkan enzim lipase atau esterase yang berupaya menguraikan struktur PET (Maurya et al. 2020). Dalam meninjau prospek enzim tersebut, sampel diambil di kawasan yang mempunyai kebarangkalian bakteria penghasil enzim lipase atau esterase yang tinggi, serpihan DNA yang hadir dalam sampel dipencil, diujuk, diklon dan diekspres ke dalam perumah seperti *Escherichia coli* atau *Pichia pastoris* (Almeida et al. 2020).

Bagi kaedah secara biokatalitik pula, pengubahsuaian genetik bakteria boleh dijalankan berpandukan metabolisme PET. PET boleh diuraikan melalui hidrolisis kepada monomer asal iaitu TPA dan EG oleh mikroorganisma. Kedua-dua monomer ini mempunyai tapak jalan yang berbeza namun akhirnya akan memasuki kitaran Krebs untuk menjana tenaga bagi kemandirian spesies mikroorganisma (Salvador et al. 2019). Tapak jalan ini juga bergantung kepada kepelbagaian mikroorganisma. *Comamonas* sp. strain E6 telah dikenal pasti mempunyai gen yang mencurair TPA kepada protokatekuat (PCA) manakala mutan *Pseudomonas putida* KT2440 mempunyai kemampuan untuk menggunakan EG sebagai sumber karbon (Li et al. 2019; Sasoh et al. 2006).

Seperti yang telah dibincangkan oleh Salvador et al. (2019), gen *tph* merupakan gen yang terlibat dalam katabolisme TPA. Manakala bagi EG, antara gen yang telah dikenal pasti dalam tapak jalan penggunaan EG kepada 3-fosfoglicerat untuk memasuki kitaran Krebs adalah gen yang mengekodkan enzim gliosilat karboligase (Gcl), tartronat semialdehid reduktase (GlxR) dan gliserat-2-kinase (GlxK). Pelaksanaan pendekatan ini memerlukan pengoptimuman yang menyeluruh supaya gen yang diintegrasikan ke dalam perumah baru boleh berfungsi dengan berkesan dalam mencurair PET. Sehingga kini, pelbagai inisiatif telah dilaksanakan oleh penyelidik dalam pembangunan sel yang boleh menggunakan PET secara keseluruhannya.

Aplikasi Bio-Pembawa sebagai Vektor Bioremediasi

Salah satu cabaran dalam menjalankan bioremediasi

melalui penggunaan mikroorganisma sebagai agen biopencuraian adalah persaingan antara mikroba biopencuraian dengan mikroba asal kawasan pencemaran tersebut atau kekangan adaptasi mikroba biopencuraian terhadap faktor persekitaran. Hal ini boleh menyebabkan pengurangan keamatan sel mikroba biopencurai dan mengakibatkan proses bioremediasi tidak berlaku secara berkesan. Oleh itu, aplikasi bio-pembawa dalam proses bioremediasi untuk menghasilkan mikroba biopencurai pegun adalah alternatif yang berkesan dalam memastikan bioremediasi berlangsung secara berterusan dan cekap (Hazaimah et al. 2014).

Bio-pembawa boleh dibahagikan kepada dua iaitu organik atau tidak organik. Untuk strategi bioremediasi, penghasilan bio-pembawa organik melalui sumber polimer seperti biojisim boleh dilaksanakan. Antara biopolimer yang dikaji untuk tujuan bioremediasi adalah daripada sumber polisakarida (selulosa) dan protein (Nita et al. 2020). Antara bio-pembawa yang boleh dimanfaatkan dalam menjadi vektor kepada mikroba biopencuraian adalah seperti aerogel dan alginat.

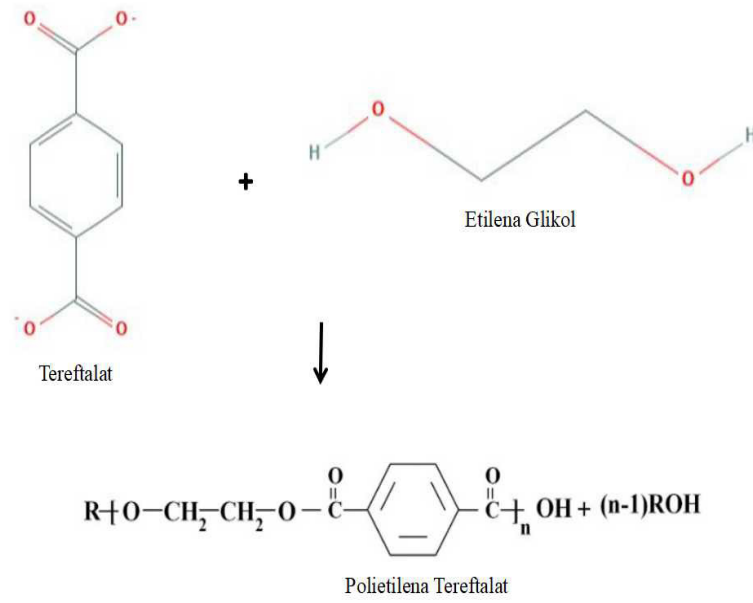
Aerogel dikategorikan sebagai bahan yang mengandungi lebih 99.8% udara di dalamnya. Aerogel adalah sangat ringan kerana ia mempunyai rangkaian liang pepejal yang tinggi dan mengandungi udara yang memenuhi ruang dalam bahan ini (Hasanpour & Hatami 2020). Luas permukaan yang tinggi

membolehkan sel bakteria bermandiri di dalamnya dan diaplikasikan secara *in situ* untuk merawat pencemaran PET di kawasan darat mahupun akuatik dengan lebih cekap. Aplikasi aerogel sebagai bio-pembawa dalam bioremediasi telah dilaksanakan terhadap minyak mentah dan mempamerkan penurunan minyak mentah yang sangat tinggi. Aerogel terjerap *B. subtilis* UKMP-10T dan *A. baumannii* UKMP-12T telah digunakan dalam merawat minyak mentah Tapis dan hasil menunjukkan peratus pencuraian jumlah petroleum hidrokarbon (TPH) masing-masing sebanyak 91.24% dan 89.20% apabila 10% (i/b) minyak mentah Tapis dibekalkan dalam tanah (Rasli 2018).

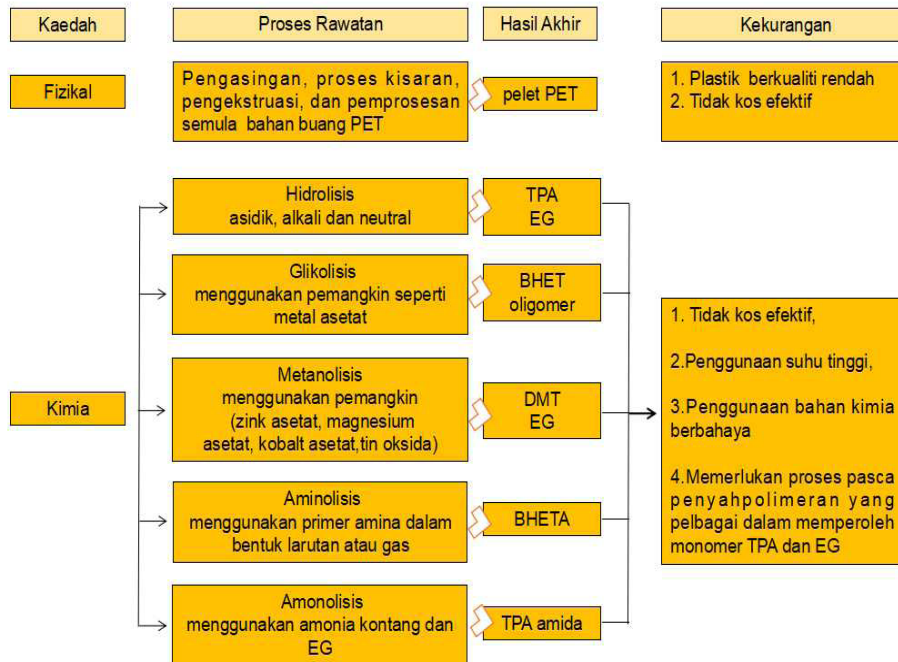
Selain itu, Chen et al. (2017) telah mengkaji dua pendekatan biopencuraian iaitu konsortium bakteria bebas (KB) dan konsortium bakteria yang disalut pada bahan kalsium alginat-karbon aktif (KP) sebagai vektor biopencuraian dalam mencurahkan minyak mentah. Lima pencilaan pencurai minyak mentah yang telah dikenal pasti dan telah dijadikan konsortium adalah bakteria *Exiguobacterium* sp. ASW-1, *Pseudomonas aeruginosa* strain ASW-2, *Alcaligenes* sp. ASW-3, *Alcaligenes* sp. ASS-1 dan *Bacillus* sp. ASS-2. Kajian tersebut mendapati KP mempamerkan pencuraian minyak mentah lebih baik berbanding KB. Selain itu, sebanyak 86.1% penurunan minyak mentah telah dipamerkan oleh KP apabila dieram bersama 1% minyak mentah.

JADUAL 1. Ringkasan mikroplastik primer dan sekunder

Jenis mikroplastik	Sumber	Fungsi/Kegunaan	Jenis Plastik	Rujukan
Primer	Direka dan dihasilkan dalam saiz kecil	1. Bahan pengikis atau penggosok	PE	Chang (2015)
		2. Pengemulsi, penyerap dan pengawal kelikatan.	PET	Essel et al. (2015)
		3. Teknologi peledakan udara	Akrilik, melamin, poliester	Cole et al. (2011)
Sekunder	Terhasil daripada plastik yang dilupuskan, terdedah kepada oksigen dan cahaya matahari lalu mengalami kemerosotan separa dan pemecahan	1. Botol minuman	PET	WWF (2020)
		2. Pembungkusan	PET, PP	Gomes et al. (2019)
		3. Baju atau tekstil	PET	Quartinello et al. (2017)
		4. Plastik pakai buang (contoh: beg beli-belah, perkakas makanan)	PET, PP, PS, PE	Puglisi et al. (2019); Farzi et al. (2019); Hwang et al. (2020)



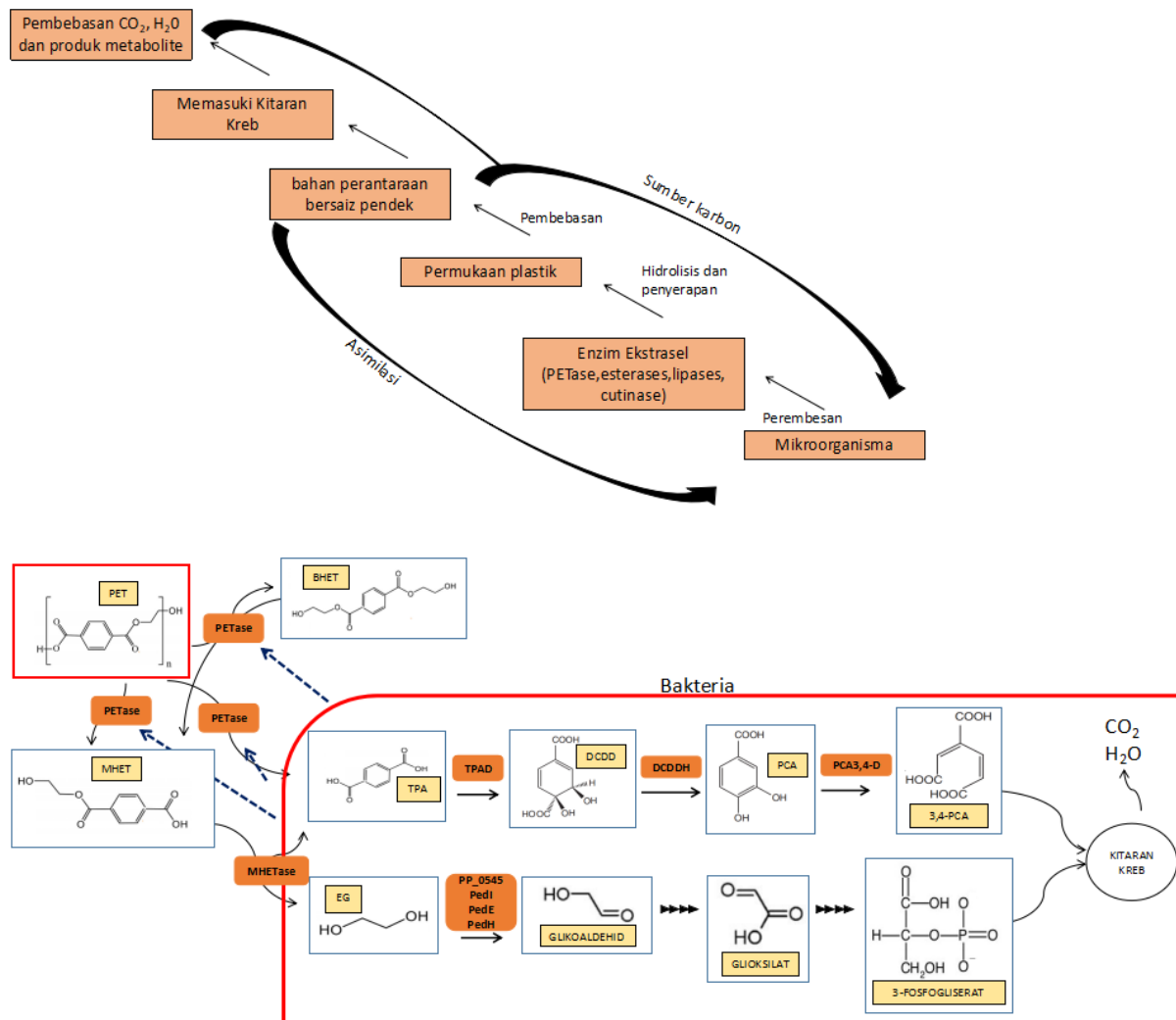
RAJAH 1. Pembentukan PET melalui tindak balas pemeluwapan dan pempolimeran asid tereftalik dengan etilena glikol



RAJAH 2. Rawatan secara fizikal dan kimia bahan buangan PET

JADUAL 2. Senarai pencilan bakteria dan rekombinan yang berpotensi menguraikan PET

Spesies	Kaedah Biodegradasi	Pengkulturan	Penguraian PET	Rujukan
<i>Ideonella sakaiensis</i>	Biokatalitik dan memencilkan PETase dan MHETase	Media garam mineral bersama filem PET pada suhu 30 °C dieram selama 42 hari	Hampir mencapai 100% penguraian PET	Yoshida et al. (2016)
<i>Comamonas testosterone F6</i>	Biokatalitik	Media garam mineral bersama partikel PET pada suhu 37°C selama 48 jam	Penurunan saiz PET daripada 7.3 µM kepada 1.58 µM	Gong et al. (2018)
<i>Streptomyces</i> sp.	Biokatalitik	Media garam mineral bersama botol PET yang dihancurkan kepada saiz 500, 420, 300 and 212 µm pada suhu 28 °C selama 18 hari	Penguraian PET sebanyak 49.2%, 57.4%, 62.4%, dan 68.8% masing-masing bagi saiz PET 500, 420, 300 and 212 µm	Farzi et al. (2019)
<i>Bacillus cereus</i>	Biokatalitik	Media garam mineral bersama PET bersaiz 250 µM pada suhu 29 °C selama 40 hari	6.6% pengurangan berat PET direkodkan	Auta et al. (2017b)
<i>Bacillus gottheilii</i>	Biokatalitik	Media garam mineral bersama PET bersaiz 250 µM pada suhu 29 °C selama 40 hari	3.0% pengurangan berat PET direkodkan	Auta et al. (2017b)
<i>Clostridium thermocellum</i>	Biokatalitik rekombinan Leaf-Compost kutinase (LCC)	Media minima GS bersama filem PET pada suhu 60 °C dieram selama 14 hari	Penguraian PET sebanyak 62%	Yan et al. (2020)
<i>Serratia plymuthica</i> IV-11-34	Biokatalitik	Media enap cemar bersama filem PET pada suhu 25.8 °C selama 40 hari di dalam bioreaktor	Penguraian PET diukur dengan pembebasan karbon dioksida sebanyak lebih kurang 7%	Dąbrowska et al. (2021)



RAJAH 3. Mekanisme bagi biodegradasi plastik PET di bawah keadaan aerobik

JADUAL 3. Pencilan bakteria pendegradasi bahan hidrofobik menghasilkan biosurfaktan

Spesies	Biosurfaktan	Bahan Hidrofobik	Rujukan
<i>Bacillus</i> sp. PE3	Lipopeptida	PE	Kavitha & Bhuvaneswari (2021)
<i>Bacillus subtilis</i>	Surfaktin	PE	Vimala & Mathew (2016)
<i>Bacillus pumilus</i> 2A	Glikolipid	hidrokarbon	MarchutMikolajczyk et al. (2018)
<i>Nocardiopsis</i> sp. mrinalini9	Tidak dikenal pasti	PE, cawan plastik, diesel	Singh & Sedhuraman (2015)
<i>Bacillus licheniformis</i>	Tidak dikenal pasti	PE	Mukherjee et al. (2016)

KESIMPULAN

Plastik dan lazimnya jenis PET telah menjadi salah satu pencemaran sejagat yang meruncing kerana sifatnya yang tahan lama dan dihasilkan secara pakai buang. Kesannya, bahan buangan PET boleh berada dalam persekitaran secara berterusan dan menghasilkan mikroplastik. Seperti yang telah dijelaskan sebelum ini, pendekatan bakteria penghasil biofilem, biosurfaktan, aplikasi biologi molekul serta bio-pembawa memiliki kelebihan masing-masing dan berpotensi untuk menguraikan bahan polimer plastik. Namun perlaksanaannya pada peringkat *in situ* masih kurang dan perlu ditambahbaik untuk membasmi masalah lambakan bahan buangan PET. Biodegradasi plastik PET boleh terlaksana dengan lebih berkesan dan mampan sekiranya kesemua aspek yang dibincangkan boleh dilaksanakan sama ada secara tunggal atau bersepadu dalam menjadi prob untuk merawat bahan buangan PET. Aplikasi bio-pembawa dalam bioremediasi PET memberikan kesan yang berterusan dalam menguraikan PET apabila disepadukan dengan pendekatan yang telah dibincangkan. Gabungan aplikasi bio-pembawa dengan 1) enzim pengurai PET yang dibangunkan secara biokatalitik seperti lipase dan esterase dan 2) bakteria penghasil biofilem dan biosurfaktan boleh disepadukan untuk diaplikasikan secara *in situ* supaya proses bioremediasi PET terlaksana secara berterusan dalam menguraikan bahan buangan PET. Selain dapat mengurangkan dan membasmi masalah lambakan bahan buangan PET, kitar semula bahan buangan PET juga dapat dicapai.

PENGHARGAAN

Penyelidikan ini dibiayai oleh Kementerian Pengajian Tinggi Malaysia melalui Geran FRGS/1/2020/STG01/UKM/02/7.

RUJUKAN

- Abbasnezhad, H., Gray, M. & Foght, J.M. 2011. Influence of adhesion on aerobic biodegradation and bioremediation of liquid hydrocarbons. *Applied Microbiology and Biotechnology* 92: 653-675.
- Almeida, J.M., Alnoch, R.C., Souza, E.M., Mitchell, D.A. & Krieger, N. 2020. Metagenomics: Is it a powerful tool to obtain lipases for application in biocatalysis? *Biochimica et Biophysica Acta - Proteins and Proteomics* 1868(2): 140320.
- Amelia, T.S.M., Khalik, W.M.A.W.M., Ong, M.C., Shao, Y.T., Pan, H.J. & Bhubalan, K. 2021. Marine microplastics as vectors of major ocean pollutants and its hazards to the marine ecosystem and humans. *Progress in Earth and Planetary Science* 8: 12.
- Andrady, A.L. 2011. Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin* 62(8): 1596-1605.
- Aqma, W.S. & Quilty, B. 2015. Influences of extracellular polymeric substances (EPS) for autoaggregation of *Pseudomonas putida* CP1 during growth on monochlorophenol. *Malaysian Journal of Microbiology* 11(3): 246-253.
- Ashton, K., Holmes, L. & Turner, A. 2010. Association of metals with plastic production pellets in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin* 60(11): 2050-2055.
- Auta, H.S., Emenike, C.U. & Fauziah, S.H. 2017a. Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential solutions. *Environment International* 102: 165-176.
- Auta, H.S., Emenike, C.U. & Fauziah, S.H. 2017b. Screening of *Bacillus* strains isolated from mangrove ecosystems in Peninsular Malaysia for microplastic degradation. *Environmental Pollution* 231: 1552-1559.
- Bowley, J., Baker-Austin, C., Porter, A., Hartnell, R. & Lewis, C. 2021. Oceanic hitchhikers - Assessing pathogen risks from marine microplastic. *Trends in Microbiology* 29(2): 107-116.
- Bustamante, M., Durán, N. & Diez, M.C. 2012. Biosurfactants are useful tools for the bioremediation of contaminated soil: A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 12(4): 667-687.
- Carr, C.M., Clarke, D.J. & Dobson, A.D. 2020. Microbial polyethylene terephthalate hydrolases: Current and future perspectives. *Frontiers in Microbiology* 11: 571265.
- Chang, M. 2015. Reducing microplastics from facial exfoliating cleansers in wastewater through treatment versus consumer product decisions. *Marine Pollution Bulletin* 101(1): 330-333.
- Chen, H.L., Nath, T.K., Chong, S., Foo, V., Gibbins, C. & Lechner, A.M. 2021. The plastic waste problem in Malaysia: Management, recycling and disposal of local and global plastic waste. *SN Applied Sciences* 3: 437.
- Chen, Q., Li, J., Liu, M., Sun, H. & Bao, M. 2017. Study on the biodegradation of crude oil by free and immobilized bacterial consortium in marine environment. *PLoS ONE* 12(3): e0174445.
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C. & Galloway, T.S. 2011. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin* 62(12): 2588-2597.
- Dąbrowska, G.B., Tylman-Mojżesz, W., Mierek-Adamska, A., Richert, A. & Hryniewicz, K. 2021. Potential of *Serratia plymuthica* IV-11-34 strain for biodegradation of polylactide and poly (ethylene terephthalate). *International Journal of Biological Macromolecules* 193: 145-153.
- Essel, R., Engel, L., Carus, M. & Ahrens, R.H. 2015. *Sources of Microplastics Relevant to Marine Protection in Germany*. Dessau-Roßlau: Federal Environment Agency. hlm. 1-44.
- Farzi, A., Dehnad, A. & Fotouhi, A.F. 2019. Biodegradation of polyethylene terephthalate waste using *Streptomyces* species and kinetic modeling of the process. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 17: 25-31.

- Gao, R. & Sun, C. 2021. A marine bacterial community capable of degrading poly(ethylene terephthalate) and polyethylene. *Journal of Hazardous Materials* 416: 125928.
- Geyer, R., Jambeck, J.R. & Law, K.L. 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances* 3(7): 25-29.
- Ghatge, S., Yang, Y., Ahn, J.H. & Hur, H.G. 2020. Biodegradation of polyethylene: A brief review. *Applied Biological Chemistry* 63: 27.
- Ghosh, S., Qureshi, A. & Purohit, H.J. 2019. Microbial degradation of plastics: Biofilms and degradation pathways. Dalam *Contaminants in Agriculture and Environment: Health Risks and Remediation*, disunting oleh Kumar, V., Kumar, R., Singh, J. & Kumar, P. India: Agro Environ Media. hlm. 184-199.
- Gilan, I., Hadar, Y. & Sivan, A. 2004. Colonization, biofilm formation and biodegradation of polyethylene by a strain of *Rhodococcus ruber*. *Applied Microbiology Biotechnology* 65: 97-104.
- Gomes, T.S., Visconte, L.L.Y. & Pacheco, E.B.A.V. 2019. Life cycle assessment of polyethylene terephthalate packaging: An overview. *Journal of Polymers and the Environment* 27(3): 533-548.
- Gong, J., Kong, T., Li, Y., Li, Q., Li, Z. & Zhang, J. 2018. Biodegradation of microplastic derived from poly(ethylene terephthalate) with bacterial whole-cell biocatalysts. *Polymers* 10(1326): 1-13.
- Gutierrez, T., Berry, D., Yang, T., Mishamandani, S., McKay, L., Teske, A. & Aitken, M.D. 2013. Role of bacterial exopolysaccharides (EPS) in the fate of the oil released during the deepwater horizon oil spill. *PLoS ONE* 8(6): e67717.
- Hahladakis, J.N., Velis, C.A., Weber, R., Iacovidou, E. & Purnell, P. 2018. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of Hazardous Materials* 344: 179-199.
- Hamid, F.S., Bhatti, M.S., Anuar, N., Anuar, N., Mohan, P. & Periathamby, A. 2018. Worldwide distribution and abundance of microplastic: How dire is the situation? *Waste Management and Research* 36(10): 873-897.
- Han, Y.N., Wei, M., Han, F., Fang, C., Wang, D., Zhong, Y.J., Guo, C.L., Shi, X.Y., Xie, Z.K. & Li, F.M. 2020. Greater biofilm formation and increased biodegradation of polyethylene film by a microbial consortium of *Arthrobacter* sp. and *Streptomyces* sp. *Microorganisms* 8(12): 1979.
- Hasanpour, M. & Hatami, M. 2020. Application of three dimensional porous aerogels as adsorbent for removal of heavy metal ions from water/wastewater: A review study. *Advances in Colloid and Interface Science* 284: 102247.
- Hazaimah, M., Abd Mutalib, S., Abdullah, P.S., Kok Kee, W. & Surif, S. 2014. Enhanced crude oil hydrocarbon degradation by self-immobilized bacterial consortium culture on sawdust and oil palm empty fruit bunch. *Annals of Microbiology* 64: 1769-1777.
- Hwang, J., Choi, D., Han, S., Jung, S.Y., Choi, J. & Hong, J. 2020. Potential toxicity of polystyrene microplastic particles. *Scientific Reports* 10: 7391.
- Hwi, T.Y., Ibrahim, Y.S. & Khalik, W.M.A.W.M. 2020. Microplastic abundance, distribution, and composition in Sungai Dungun, Terengganu, Malaysia. *Sains Malaysiana* 49(7): 1479-1490.
- Issac, M.N. & Kandasubramanian, B. 2021. Effect of microplastics in water and aquatic systems. *Environmental Science and Pollution Research* 28(16): 19544-19562.
- Kamimura, N. & Masai, E. 2014. The protocatechuate 4,5-cleavage pathway: Overview and new findings. Dalam *Biodegradative Bacteria*, disunting oleh Nojiri, H., Tsuda, M., Fukuda, M. & Kamagata, Y. hlm. 207-226.
- Kamimura, N., Aoyama, T., Yoshida, R., Takahashi, K., Kasai, D., Abe, T., Mase, K., Katayama, Y., Fukuda, M. & Masai, E. 2010. Characterization of the protocatechuate 4,5-cleavage pathway operon in *Comamonas* sp. strain E6 and discovery of a novel pathway gene. *Applied Environmental Microbiology* 76(24): 8093-8101.
- Kavitha, R. & Bhuvaneswari, V. 2021. Assessment of polyethylene degradation by biosurfactant producing ligninolytic bacterium. *Biodegradation* 32: 531-549.
- Kawai, F., Kawabata, T. & Oda, M. 2019. Current knowledge on enzymatic PET degradation and its possible application to waste stream management and other fields. *Applied Microbiology and Biotechnology* 103(11): 4253-4268.
- Kong, Y. & Hay, J.N. 2002. The measurement of the crystallinity of polymers by DSC. *Polymer* 43: 3873-3878.
- Leslie, H.A. 2014. *Review of Microplastics in Cosmetics – Scientific Background on a Potential Source of Plastic Particulate Marine Litter to Support Decision-Making*. IVM - Institute for Environmental Studies, Amsterdam.
- Li, B., Ding, Y., Cheng, X., Sheng, D., Xu, Z., Rong, Q., Wu, Y., Zhao, H., Ji, X. & Zhang, Y. 2020. Polyethylene microplastics affect the distribution of gut microbiota and inflammation development in mice. *Chemosphere* 244: 125492.
- Li, W.J., Jayakody, L.N., Franden, M.A., Wehrmann, M., Daun, T., Hauer, B., Blank, L.M., Beckham, G.T., Klebensberger, J. & Wierckx, N. 2019. Laboratory evolution reveals the metabolic and regulatory basis of ethylene glycol metabolism by *Pseudomonas putida* KT2440. *Environmental Microbiology* 21(10): 3669-3682.
- MarchutMikolajczyk, O., Drożdżyński, P., Pietrzyk, D. & Antczak, T. 2018. Biosurfactant production and hydrocarbon degradation activity of endophytic bacteria isolated from *Chelidonium majus* L. *Microbial Cell Factories* 17: 171.
- Maurya, A., Bhattacharya, A. & Khare, S.K. 2020. Enzymatic remediation of polyethylene terephthalate (PET)-based polymers for effective management of plastic wastes: An overview. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 8: 602325.

- Miandad, R., Rehan, M., Barakat, M.A., Aburizaiza, A.S., Khan, H., Ismail, I.M.I., Dhavamani, J., Gardy, J., Hassanpour, A. & Nizami, A.S. 2019. Catalytic pyrolysis of plastic waste: Moving toward pyrolysis based biorefineries. *Frontiers in Energy Research* 7: 1-27.
- Mohanan, N., Montazer, Z., Sharma, P.K. & Levin, D.B. 2020. Microbial and enzymatic degradation of synthetic plastics. *Frontiers in Microbiology* 11: 1-22.
- Montazer, Z., Najafi, M.B.H. & Levin, D.B. 2020. Challenges with verifying microbial degradation of polyethylene. *Polymers* 12(1): 123.
- Mukherjee, S., Chowdhuri, U.R., Patit, P. & Kundu, P.P. 2016. Bio-degradation of polyethylene waste by simultaneous use of two bacteria: *Bacillus licheniformis* for production of bio-surfactant and *Lysinibacillus fusiformis* for bio-degradation. *RSC Advances* 6: 2982-2992.
- Nita, L.E., Ghilan, A., Rusu, A.G., Neamtu, I. & Chiriac, A.P. 2020. New trends in bio-based aerogels. *Pharmaceutics* 12(5): 449.
- Patria, M.P., Santoso, C.A. & Tsabita, N. 2020. Microplastic ingestion by periwinkle snail *Littoraria scabra* and mangrove crab *Metopograpsus quadridentata* in Pramuka Island, Jakarta Bay, Indonesia. *Sains Malaysiana* 49(9): 2151-2158.
- Puglisi, E., Romaniello, F., Galletti, S., Boccaleri, E., Frache, A. & Cocconcelli, P.S. 2019. Selective bacterial colonization processes on polyethylene waste samples in an abandoned landfill site. *Scientific Reports* 9: 14138.
- Quartinello, F., Vajnhandl, S., Valh, V.J., Farmer, T.J., Vončina, B., Lobnik, A., Acero, E.H., Pellis, A. & Guebitz, G.M. 2017. Synergistic chemo-enzymatic hydrolysis of poly(ethylene terephthalate) from textile waste. *Microbial Biotechnology* 10(6): 1376-1383.
- Rasli, S.R.A.M. 2018. Penggunaan aerogel selulosa bagi penjerapan bakteria untuk bioremediasi minyak mentah. MSc. Tesis. Universiti Kebangsaan Malaysia (Tidak diterbitkan).
- Ribitsch, D., Acero, E.H., Greimel, K., Eiteljoerg, I., Trotscha, E., Freddi, G., Schwab, H. & Guebitz, G.M. 2012. Characterization of a new cutinase from *Thermobifida alba* for PET-surface hydrolysis. *Biocatalysis and Biotransformation* 30(1): 2-9.
- Roberts, C., Edwards, S., Vague, M., León-Zayas, R., Scheffer, H., Chan, G., Swartz, N.A. & Mellies, J.L. 2020. Environmental consortium containing *Pseudomonas* and *Bacillus* species synergistically degrades polyethylene terephthalate plastic. *Applied And Environmental Science* 5(6).
- Rochman, C.M., Hentschel, B.T. & Teh, S.J. 2014. Long-term sorption of metals is similar among plastic types: Implications for plastic debris in aquatic environments. *PLoS ONE* 9(1): e01151-20.
- Salvador, M., Abdulmutalib, U., Gonzalez, J., Kim, J., Smith, A.A., Faulon, J.L., Wei, R., Zimmermann, W. & Jimenez, J.I. 2019. Microbial genes for a circular and sustainable bio-PET economy. *Genes* 10(373): 1-19.
- Sarijan, S., Azman, S., Said, M.I.M. & Lee, M.H. 2019. Ingestion of microplastics by commercial fish in Skudai river, Malaysia. *EnvironmentAsia* 12(3): 75-84.
- Sasoh, M., Masai, E., Ishibashi, S., Hara, H., Kamimura, N., Miyauchi, K. & Fukuda, M. 2006. Characterization of the terephthalate degradation genes of *Comamonas* sp. strain E6. *Applied and Environmental Microbiology* 72(3): 1825-1832.
- Sharma, B., Rawat, H., Pooja & Sharma, R. 2017. Bioremediation - A progressive approach toward reducing plastic wastes. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 6(12): 1116-1131.
- Singh, R., Paul, D. & Jain, R.K. 2006. Biofilms: Implications in bioremediation. *Trends in Microbiology* 14(9): 389-397.
- Singh, M.J. & Sedhuraman, P. 2015. Biosurfactant, polythene, plastic, and diesel biodegradation activity of endophytic *Nocardiopsis* sp. mrinalini9 isolated from *Hibiscus rosasinensis* leaves. *Bioresources and Bioprocess* 2: 2. <https://doi.org/10.1186/s40643-014-0034-4>
- Sivadon, P., Barnier, C., Urios, L. & Grimaud, R. 2019. Biofilm formation as a microbial strategy to assimilate particulate substrates. *Environmental Microbiology Reports* 11(6): 749-764.
- Sivan, A., Szanto, M. & Pavlov, V. 2006. Biofilm development of the polyethylene-degrading bacterium *Rhodococcus ruber*. *Applied Microbiology and Biotechnology* 72: 346-352.
- Suardy, N.H., Tahrim, N.A. & Ramli, S. 2020. Analysis and characterization of microplastic from personal care products and surface water in Bangi, Selangor. *Sains Malaysiana* 49(9): 2237-2249.
- Taniguchi, I., Yoshida, S., Hiraga, K., Miyamoto, K., Kimura, Y. & Oda, K. 2019. Biodegradation of PET: Current status and application aspects. *ACS Catalysis* 9: 4089-4105.
- Toyofuku, M., Inaba, T., Kiyokawa, T., Obana, N., Yawata, Y. & Nomura, N. 2016. Environmental factors that shape biofilm formation. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry* 80(1): 7-12.
- Vague, M., Chan, G., Roberts, C., Swartz, N.A. & Mellies, J.L. 2019. *Pseudomonas* isolates degrade and form biofilms on polyethylene terephthalate (PET) plastic. *Sustainability* 11(1): 1-14.
- Vimala, P.P. & Mathew, L. 2016. Biodegradation of polyethylene using *Bacillus subtilis*. *Procedia Technology* 24: 232-239.
- Wagner, M., Scherer, C., Alvarez-Muñoz, D., Brennholt, N., Bourrain, X., Buchinger, S., Fries, E., Grosbois, C., Klasmeier, J., Marti, T., Rodriguez-Mozaz, S., Urbatzka, R., Vethaak, A.D., Winther-Nielsen, M. & Reifferscheid, G. 2014. Microplastics in freshwater ecosystems: What we know and what we need to know. *Environmental Sciences Europe* 26: 12).
- Webb, H.K., Arnott, J., Crawford, R.J. & Ivanova, E.P. 2013. Plastic degradation and its environmental implications with special reference to poly(ethylene terephthalate). *Polymers* 5(1): 1-18.

- WWF. 2020. *Plastic Packaging in Southeast Asia and China*. https://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/wwf_plastic_packaging_in_se_asia_2020_v8_0214_final.pdf. Diakses pada 25 Februari 2021.
- Yan, F., Wei, R., Cui, Q., Bornscheuer, U.T. & Liu, Y.J. 2021. Thermophilic whole-cell degradation of polyethylene terephthalate using engineered *Clostridium thermocellum*. *Microbial Biotechnology* 14(2): 374-385.
- 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.
- Zettler, E.R., Mincer, T.J. & Amaral-Zettler, L.A. 2013. Life in the “plastisphere”: Microbial communities on plastic marine debris. *Environmental Science & Technology* 47(13): 7137-7146.
- *Pengarang untuk surat-menyurat; email: syaidatul@ukm.edu.my