

PELUANG LIMBAH KELAPA SAWIT UNTUK PRODUKSI POLIHIDROKSIALKANOAT SEBAGAI BIOPLASTIK

The Opportunities of Oil Palm Waste for Production of Polyhydroxyalkanoate as Bioplastic

HASRUL ABDI HASIBUAN

Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS)

Indonesian Oil Palm Research Institute (IOPRI)

Jl. Brigjend Katamso No. 51 Medan 20158, Indonesia

E-mail: hasibuan_abdi@yahoo.com

ABSTRAK

Plastik konvensional merupakan plastik berbasis minyak bumi (petrokimia), yang memiliki permasalahan meliputi ketersediaan bahan baku semakin sedikit dan sampah plastik ini menyebabkan polusi lingkungan karena sulit mengalami degradasi secara alami. Oleh karena itu, plastik yang dibuat dari bahan baku yang *biodegradable* dan berkelanjutan perlu untuk terus dikembangkan. Bioplastik adalah plastik yang dibuat dari bahan alami dan salah satu bahan bakunya adalah polihidroksialkanoat (PHA), yang memiliki sifat *biodegradable*, fleksibel dan termoplastik. Polihidroksialkanoat dihasilkan oleh bakteri sebagai cadangan karbon dan energi intraseluler menggunakan substrat seperti gula dan asam lemak. Bioplastik berbahan PHA telah dibuat menjadi barang dagangan sebagai bahan kemasan. Peningkatan sifat fisik dari PHA sebagai bahan kemasan dilakukan melalui pencampuran dengan bahan polimer yang *biodegradable*, plastisiser, dan antimikroba. Kelemahan produksi PHA adalah biaya produksinya tinggi namun dapat diminimalisasi dengan menggunakan bahan baku yang tepat. Limbah cair dan padat dari industri kelapa sawit merupakan bahan yang berpotensi untuk produksi PHA karena dengan pemanfaatannya dapat meminimalkan limbah, meningkatkan nilai tambah dan mendukung industri kelapa sawit yang berkelanjutan. Jenis-jenis PHA yang dihasilkan dari limbah cair dan padat dari industri kelapa sawit sangat tergantung dari substrat dan bakteri yang digunakan. Strategi yang dapat dilakukan untuk mempercepat hilirisasi bioplastik berbasis PHA dari industri kelapa sawit meliputi: (1) penggunaan teknologi pengolahan limbah cair dan padat dari pabrik kelapa sawit secara terintegrasi, (2) penggunaan bakteri yang tepat untuk mengakumulasi PHA dari limbah cair (seperti *Rhodobacter sphaeroides*, *Delftia tsuruhatensis* Bet002, *Betaproteobacteria*, *Alphaproteobacteria*, *Gammaproteo-*

bacteria), dan limbah padat (seperti *B. megaterium*, *Bacillus cereus suaeda* B-001), dan (3) pemanfaatan PHA pada produk yang memiliki nilai tambah tinggi seperti produk biomedis dan farmasi.

Kata kunci: bioplastik, kelapa sawit, limbah, minyak sawit, polihidroksialkanoat

ABSTRACT

Conventional plastic is petroleum-based plastic, which has problems including the availability of fewer raw materials, and this plastic waste causes environmental pollution because it is difficult to natural degradation. Therefore, plastics made from biodegradable and sustainable raw materials need to develop. Bioplastics are plastics made from natural materials and one of the raw materials is polyhydroxyalkanoate (PHA), which has biodegradable, flexible, and thermoplastic properties. Polyhydroxyalkanoate is produced by bacteria as carbon reserves and intracellular energy using substrates such as sugar and fatty acids. Bioplastics made from PHA have been commercialized as packaging materials. Improvement of the physical properties of PHA as a packaging material is conducted by mixing it with biodegradable polymerizers, plasticizers, and antimicrobials. The disadvantage of PHA production is that its production costs are high but can be minimized by using appropriate raw materials. Liquid and solid waste from the oil palm industry are materials that have the potential for the production of PHA because its utilization can minimize waste, increase added value, and support the sustainable oil palm industry. The types of PHA that are produced from liquid and solid wastes from the palm oil industry are highly dependent on the substrate and bacteria used. Strategies that can be taken to accelerate the downstream of PHA-based bioplastics from the oil

palm industry include: (1) the use of liquid and solid waste from the oil palm industry with integrated processing technology, (2) the use of appropriate bacteria to accumulate PHA from liquid waste (such as *Rhodobacter sphaeroides*, *Delftia tsuruhatensis* Bet002, *Betaproteobacteria*, *Alphaproteobacteria*, *Gammaproteobacteria*), and solid waste (for example *B. megaterium*, *Bacillus cereus* suaeda B-001), and (3) utilization of PHA on products that have a high added value such as biomedical and pharmaceuticals products.

Key words: bioplastic, oil palm, waste, palm oil, polyhydroxyalkanoate

PENDAHULUAN

Plastik berbasis minyak bumi (petrokimia) merupakan jenis plastik yang sangat fleksibel dan telah dimanfaatkan dalam beragam produk. Masalahnya, sampah plastik tersebut memiliki efek polutan yang sangat besar dan terakumulasi di berbagai lingkungan karena sulit mengalami degradasi secara alami (Mozejko-Ciesielska and Kiewisz, 2016; Urtuvia *et al.*, 2014; Yustinah *et al.*, 2019). Polimer *biodegradable* baru terus dikembangkan untuk menggantikan plastik konvensional. Umumnya, plastik *biodegradable* diproduksi secara biologis dari sumber terbarukan. Masalah dalam pengembangan bioplastik adalah biaya produksinya lebih tinggi dibandingkan plastik berbasis petrokimia. Strategi yang dapat dilakukan untuk menurunkan biaya produksi bioplastik meliputi penggunaan bahan baku yang murah dan tersedia, serta inovasi teknologi melalui penggunaan bakteri yang sesuai untuk menghasilkan bioplastik (Ivanov *et al.*, 2015). Di Indonesia, bioplastik telah dihasilkan dengan menggunakan bahan baku pati ubi kayu meliputi Enviplast, Ecoplast dan Eco bag (Kamsiati *et al.*, 2017).

Bioplastik adalah plastik yang dibuat dari bahan alami, yang mudah terdegradasi (*biodegradable*) dan terdekomposisi (Coles *et al.*, 2011). Bioplastik terdekomposisi menjadi CO₂, H₂O, dan senyawa anorganik atau biomassa melalui aksi enzimatis mikroorganisme (Kumar and Thakur, 2017). Bioplastik dari polimer *biodegradable* dapat diklasifikasikan berdasarkan bahan bakunya meliputi a). Agrobiopolimer

seperti polisakarida (pati, produk lignoselulosa, pektin, kitin dan gum), protein dan lignin; b). Biopolimer dari mikroorganisme (polihidroksialkanoat, polihidroksibutirat, polihidroksibutirat kohidroksivalerat); c). Biopolimer dari bioteknologi yang diturunkan dari monomer seperti polilaktida; dan c). Biopolimer dari produk petrokimia yang disintesis dari monomer sintetik (polikaprolakton, kopoliester aromatik, kopoliester alifatik, dan homo poliester (Coles *et al.*, 2011; Kumar and Thakur, 2017). Produksi dan konsumsi bioplastik akan meningkat pada masa depan di dunia (Arikan and Ozsoy, 2015) dengan tingkat pertumbuhan 10-20% per tahun dan diperkirakan meningkat dengan rata-rata 12,6% pada 2020 (Kumar and Thakur, 2017). Menurut Shen *et al.* (2010) bahwa pada tahun 2020, bioplastik menyumbang sekitar 3,45 juta ton per tahun dari total produksi plastik dunia. Total produksi plastik di dunia pada tahun 2018 sebesar 359 juta metrik ton (Garside, 2019).

Polihidroksialkanoat (PHA) adalah plastik yang dapat terurai secara hayati yang disintesis oleh beragam bakteri dari berbagai substrat termasuk gula dan asam lemak (Urtuvia *et al.*, 2014). Bakteri yang umum digunakan untuk produksi PHA adalah *Alcaligenes latus*, *B. megaterium*, *C. necator* dan *P. oleovorans* (Kumar and Thakur, 2017). Polihidroksialkanoat berfungsi sebagai cadangan makanan yaitu saat defisiensi makanan dapat sebagai sumber karbon. Di samping itu, PHA bersifat tidak larut air dan disintesis atau diproduksi oleh mikroorganisme (Mozejko-Ciesielska and Kiewisz, 2016). Lebih dari 300 mikroorganisme yang berbeda telah teridentifikasi memiliki kemampuan untuk mengakumulasi PHA di dalam sel sebagai cadangan karbon dan energi (Kourmentza and Kornaros, 2016). Polihidroksialkanoat biasanya berada di dalam sel (produk metabolisme sekunder intraseluler), yang diproduksi oleh mikroorganisme dengan karbon berlebih dan membatasi nutrisi untuk pertumbuhannya seperti nitrogen, fosfor, sulfur, magnesium dan oksigen (Wong *et al.*, 2012; Yustinah *et al.*, 2019). Keanekaragaman komposisi monomer PHA berpotensi menghasilkan bahan polimer dengan berat molekul tinggi (Gumel *et al.*, 2012). Sekitar 150 struktur monomer yang

berbeda telah dilaporkan berasal dari kelompok PHA dan yang paling umum diantaranya adalah *polyhydroxybutyrate* (PHB) dan *poly-(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate)* (PHBV). Polimer berbasis bio ini memiliki karakteristik fisikokimia yang serupa dengan plastik konvensional seperti polipropilen (PP) dan *low-density polyethylene* (LDPE) (Kourmentza and Kornaros, 2016). Polihidroksialkanoat yang telah dibuat menjadi barang dagangan adalah Biopol™ yang diperoleh dari hasil metabolisme bakteri (Matavuly and Molitori, 2015). Biopol™ merupakan material plastik yang *biodegradable* dan telah dihasilkan pada skala besar (Imperial Chemical Industries, 1990).

Kelemahan produksi PHA adalah biaya produksi yang masih relatif tinggi (sekitar 15 kali lebih mahal dari polipropilen) namun dengan potensinya yang sangat luas, biopolimer ini nyata untuk diproduksi dan diaplikasikan. Potensi pasar biopolimer akan sangat bergantung pada harganya dan juga pada pengembangan teknologi yang efisien untuk memproses polimer ini (Castilho *et al.*, 2009). Oleh karena itu, pengurangan biaya produksi bioplastik melalui penggunaan bahan baku yang murah (biomassa dan limbah organik) dan inovasi teknologi (fermentasi menggunakan bakteri yang mengakumulasi PHA) sangat penting untuk

produksi dan aplikasi bioplastik (Ivanov *et al.*, 2015). Pendekatan yang telah dikembangkan untuk meminimalisasi biaya produksi PHA yaitu melalui penggunaan limbah agroindustri, produksi produk selain PHA secara bersamaan (seperti biosurfaktan, pigmen dan karotenoid, asam-asam amino dan produknya, hidrogen, alkohol dan senyawa-senyawa organik), ekstraksi polimer menggunakan pelarut bio dan lain-lain (Kumar and Kim, 2018). Tren masa depan adalah fokus pada pengembangan proses yang lebih efisien dan ekonomis untuk produksi, isolasi, pemurnian dan peningkatan sifat material PHA (Keshavarz and Roy, 2010).

Indonesia merupakan negara agraris yang tidak hanya menghasilkan produk pertanian dan perkebunan tetapi juga produk samping berupa biomassa yang diantaranya dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku bioplastik. Salah satu tanaman perkebunan di Indonesia adalah kelapa sawit. Perkebunan kelapa sawit menghasilkan minyak sawit dan produk samping berupa biomassa padat (tandan kosong kelapa sawit) dan limbah cair pabrik kelapa sawit. Bahan-bahan tersebut berpeluang untuk digunakan untuk produksi PHA. Tujuan penulisan makalah ini adalah untuk menyajikan informasi tentang metabolisme mikroorganisme dalam pembentukan PHA, karakteristik,

Tabel 1. Substrat dan mikroorganisme yang dapat mensintesis PHA

| Substrat utama | Mikroorganisme | Substrat lainnya | Produk PHA |
|-----------------|---|--------------------------------|---|
| Gula sederhana | <i>Alcaligenes latus</i> , <i>Ralstonia eutropha</i> , <i>Haloferax mediterranei</i> , <i>Azotobacter vinelandii</i> | | P3HB |
| | <i>Alcaligenes latus</i> , <i>Ralstonia eutropha</i> , <i>Haloferax mediterranei</i> , <i>Azotobacter vinelandii</i> | Asam-asam organik | P(3HB-3HV), P(3HB-4HB) |
| | <i>Pseudomonas putida</i> , <i>Pseudomonas citronellolis</i> | | P3HHx, P3HO, dan mcl-PHA |
| | <i>Aeromonas hydrophila</i> , <i>Rhodospirillum rubrum</i> , <i>Sinorhizobium fredii</i> , <i>Rhodocyclus gelatinosus</i> | Asam-asam organik atau alkohol | P(3HB-co-3HHx), P(3HB-co-3HO) dan kopolimer scl-mcl lainnya |
| Triasilgliserol | <i>Aeromonas hydrophila</i> , <i>Aeromonas caviae</i> <i>Pseudomonas oleovorans</i> , <i>Pseudomonas stutzeri</i> , <i>Pseudomonas citronellolis</i> <i>Ralstonia eutrophia</i> | | P3HB-3HHx P3HHx, P3HO, dan mcl-PHA lainnya P3HB, P(3HB-3HV) |
| Hidrokarbon | <i>Pseudomonas oleovorans</i> , <i>Pseudomonas citronellolis</i> | | P3HHx, P3HO, P3HD dan mcl-PHA lainnya |

Keterangan: P3HHx = poly(3-hidroksilheksanoat); P3HO = poly(3-hydroxyoctoate); P3HD = poly(3-hydroxydodecanoate); P3HB = poly(3-hidroksibutirat); P3HV = poly(3-hydroxyvalerate), scl = short chain length, mcl = medium chain length

Sumber: Jiang *et al.* (2016)

pemanfaatannya, serta potensi pemanfaatan produk dan limbah dari industri kelapa sawit sebagai sumber bahan baku.

METABOLISME MIKROORGANISME PENGHASIL PHA

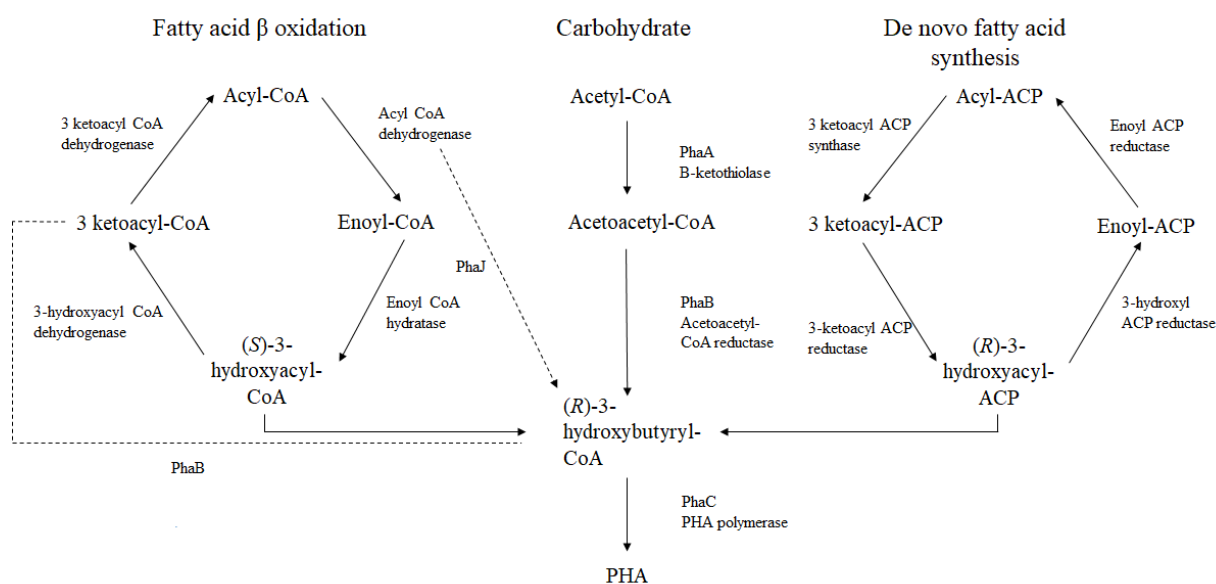
Senyawa PHA dihasilkan oleh mikroorganisme ketika nutrisinya (seperti nitrogen) terbatas. Akumulasi PHA terjadi pada fase diam yang dapat di-*recovery* dengan mudah menggunakan metode adsorpsi karbon aktif atau ekstraksi pelarut (Varsha and Savita, 2011). PHA disintesis oleh mikroba (bakteri dan *archaea*) dari berbagai sumber karbon seperti disajikan pada Tabel 1. Umumnya, mikroba yang mengakumulasi PHA adalah mikroba gram negatif sedangkan gram positif sedikit. *Archaea* yang mengakumulasi PHA terbatas pada spesies *Haloarchaea* (Akinmulewo and Nwinyi, 2019).

Umumnya, substrat yang digunakan untuk produksi PHA dapat dibagi menjadi tiga kelompok meliputi gula sederhana (monosakarida), triasilgliserol dan hidrokarbon. Sebagian besar mikroorganisme penghasil PHA dapat menggunakan gula sederhana, sementara triasilgliserol hanya dilaporkan untuk beberapa mikroorganisme (Jiang *et al.*, 2016). Glukosa, fruktosa atau sukrosa merupakan senyawa

karbohidrat yang sering digunakan dalam produksi PHA. Umumnya, glukosa atau fruktosa menghasilkan pembentukan PHB homopolimer. PHB diproduksi ketika asam alkanolat dengan panjang rantai yang sama bertindak sebagai substrat, sedangkan PHBV diperoleh saat menggunakan substrat dengan jumlah atom karbon yang ganjil (Tripathi *et al.*, 2016).

MEKANISME PEMBENTUKAN PHA DALAM METABOLISME BAKTERI

Mekanisme pembentukan PHA disajikan pada Gambar 1. Pada sebagian besar bakteri, PHA dibentuk dari asetil CoA, yang disintesis dari metabolisme karbohidrat kemudian diubah menjadi R-3-hidroksiasil (substrat PHA). Konversi dilakukan oleh enzim β -ketothiolase dan *acetoacetyl* CoA reduktase, masing-masing dikode oleh PhaA dan PhaB membentuk intermediate *acetoacetyl* CoA. Kemudian, 3 hidroksil CoA diubah menjadi PHA oleh PHA polimerase yang dikode oleh PhaC. Selain jalur Asetil CoA, pembentukan PHA dapat juga melalui jalur β oksidasi asam lemak dan sintesis asam lemak *denovo*. Komponen individu dari jalur ini dapat dikonversi menjadi 3 *hidroxybutyryl*, yang kemudian dikonversi menjadi PHA. Komposisi polimer saling berhubungan dengan komposisi



Gambar 1. Jalur metabolisme sintesis PHA (Pakalapati *et al.*, 2018)

substrat yang digunakan untuk kultur mikroba. Asam lemak volatil dengan rantai pendek merupakan substrat yang lebih disukai untuk menghasilkan PHA oleh bakteri (Pakalapati *et al.*, 2018).

Polyhydroxybutyrate (PHB) merupakan *short chain length* (scl)-PHA yang paling umum disintesis melalui tiga reaksi enzimatik utama dari asetil KoA. Enzim yang terlibat adalah β -Ketothiolase (gen *phbA*), Acetoacetyl-CoA reductase (gen *phbB*) dan PHB-polimerase (gen *phbC*). Sementara itu, *medium chain length* (mcl)-PHA sebagian besar disintesis melalui jalur asam lemak *de novo* atau siklus oksidasi β asam lemak dengan mengubah zat antara metabolisme asam lemak menjadi (R)-3-hydroxyacyl-CoA. Zat antara seperti 3-Keto-asil-CoA digunakan sebagai substrat oleh enzim PHA sintase untuk polimerisasi lebih lanjut menjadi mcl-PHA (Akinmulewo and Nwinyi, 2019). *Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate)* (P3HB-co-3HV) merupakan kombinasi dari dua homopolimer, yaitu *poly-3-hydroxybutyrate* (PHB) dan *poly-3-hydroxyvalerate* (PHV), yang dapat diatur sebagai kopolimer PHB-b-PHV, O-PHBV atau R-PHBV (Melanie *et al.*, 2018).

EKSTRAKSI PHA DARI HASIL METABOLISME INTRASELULER

Ekstraksi PHA dari hasil kultivasi atau metabolisme mikroba dapat dilakukan dengan beberapa metode meliputi ekstraksi, pencernaan (*digestion*), gangguan mekanis, *supercritical fluida*, kerapuhan sel (*cell fragility*) setelah akumulasi PHA oleh beberapa mikroba, klasifikasi udara (*air classification*), flotasi udara terlarut (*dissolved-air flotation*), pembebasan spontan (*spontaneous liberation*), sistem *aqueous two phase* dan iradiasi gamma (Jacquel *et al.*, 2008; Kunasundari and Sudesh, 2011). Metode yang paling umum digunakan adalah ekstraksi, *digestion*, dan gangguan fisik.

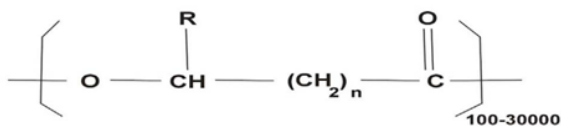
Metode ekstraksi dilakukan menggunakan pelarut seperti kloroform, 1,2-dikloroetana, metilen klorida atau beberapa karbonat siklik seperti propilena dan etilena karbonat, ester karbonik siklik, atau campuran pelarut seperti kloroform/metanol dan diklorometana/etanol.

Pemisahan P(3HB) dari pelarut dilakukan dengan penguapan pelarut atau presipitasi dalam non-pelarut. Metode *digestion* dapat dilakukan secara kimiawi dan enzimatik. Metode secara kimiawi menggunakan bahan-bahan seperti surfaktan (seperti natrium dodesil sulfat/SDS, palmitoyl karnitin sintetik), natrium hipoklorit, kombinasi natrium hipoklorit dan kloroform, surfaktan dan hipoklorit, surfaktan-chelate, perlakuan *chelate-hydrogen peroxide*, dan pemisahan selektif massa sel *non-PHA* menggunakan proton. Penambahan surfaktan dapat memecah membran untuk menghasilkan misel surfaktan dan fosfolipid membran yang menyebabkan P(3HB) dilepaskan ke dalam larutan. Penggunaan natrium hipoklorit untuk mencerna bahan seluler *non-PHA*. Kombinasi natrium hipoklorit dengan kloroform dapat melindungi bahan polimer dari degradasi. Metode secara enzimatik dilakukan menggunakan enzim proteolitik yang memiliki aktivitas tinggi pada pemisahan protein namun degradasi PHA rendah. Gangguan mekanis dilakukan melalui pemisahan protein intraseluler menggunakan gilingan (*bead mill*), homogenizer tekanan tinggi, ultrasonikasi, sentrifugasi dan perlakuan kimia (Jacquel *et al.*, 2008; Kunasundari and Sudesh, 2011).

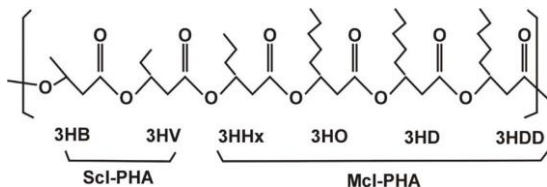
KARAKTERISASI DAN APLIKASI POLIHIDROKSIALKANOAT SEBAGAI BIOPLASTIK

Karakteristik PHA

Struktur umum PHA ditunjukkan pada Gambar 2. PHA diklasifikasikan ke dalam tiga jenis sesuai panjang rantainya meliputi pendek (*short chain length*, scl), menengah (*medium chain length*, mcl) atau panjang (*long chain length*, lcl), sesuai dengan jumlah karbon pada rantai samping. Scl-PHA memiliki kurang dari 5 atom karbon, sementara, mcl-PHA memiliki 5-14 atom karbon dan lcl-PHA memiliki lebih dari 14 atom karbon tetapi senyawa ini jarang terjadi. Senyawa *3-hydroxyvalerate* dan *3-hydroxybutyrate* adalah contoh dari scl-PHA, sedangkan *3-hydroxydecanoate*, *3-octanoate* dan *3-hydroxyhexanoate* adalah contoh dari mcl-PHA. Gambar 3 menunjukkan struktur umum PHA dengan klasifikasinya (Rai *et al.*, 2011).



Gambar 2. Struktur umum polihidroksial-kanoat (Raza *et al.*, 2018)



Keterangan: 3HB = 3-hydroxybutyrate, 3HV = 3-hydroxyvalerate, 3HHx = 3-hydroxyhexanoate, 3HO = 3-hydroxyoctanoate, 3HD = 3-hydroxydecanoate dan 3HDD = 3-hydroxydodecanoate

Gambar 3. Struktur PHA terkait klasifikasinya (Raza *et al.*, 2018)

Sifat PHA memiliki kesamaan dengan polimer petrokimia seperti polipropilen atau polistiren. Sifat PHA menunjukkan ketahanan yang baik terhadap kelembaban dan memiliki *barrier* yang baik terhadap gas (Raza *et al.*, 2018). Sifat mcl-PHA sangat berbeda dengan scl-PHA, sifat PHA ini sangat tergantung pada bakteri inang penghasil biopolimer dan kondisi fermentasinya. Scl-PHA sangat kristalin (biasanya 55-80%) menjadi poliester yang stereoregular, titik lebur berkisar 175-180 °C sedangkan suhu transisi gelas (T_g) antara 5 dan 9 °C dan sifat drop yang baik. Kopolimer panjang rantai yang pendek seperti P (3HB-co-3HV) lebih dikenal dari homopolimer scl karena titik leburnya lebih rendah dan titik kristalinitasnya juga lebih rendah, kristalnya lebih sedikit dan lebih keras. Sifat termomekanik ini sangat bervariasi dengan persentase komposisi P (3HB-co-3HV). Mcl-PHA bertindak sebagai elastomer dalam rentang suhu yang sempit karena titik lelehnya rendah (39 hingga 61°C), suhu transisi gelas di bawah suhu kamar (-43 hingga -25 °C), dan sekitar 25% berbentuk kristal. Karakteristik ini

membuat mcl-PHA lebih fleksibel dan elastis daripada scl-PHA (Możejko-Ciesielska and Kiewisz, 2016).

Aplikasi PH sebagai Bioplastik

Polihidroksialkanoat memiliki sifat yang berguna seperti biodegradabilitas, termoplastisitas, biokompatibilitas, non-toksik sehingga dapat digunakan sebagai pengganti polimer petrokimia. PHA telah digunakan dalam bidang kimia, pertanian, perikanan, biomedis dan farmasi. Di bidang kimia, PHA telah digunakan untuk pembuatan wadah kosmetik, penghalang kelembaban dalam produk sanitasi, bahan kimia murni sebagai bahan baku untuk produksi cat lateks. Di bidang pertanian digunakan sebagai pembawa untuk pelepasan herbisida atau insektisida jangka panjang (*slow release*). Di bidang perikanan, PHA juga dapat menghasilkan serat *ultrastrong* untuk alat penangkap ikan (Możejko-Ciesielska and Kiewisz, 2016).

Monomer/komponen utama dalam PHA adalah *R*-3-hydroxybutyric, yang merupakan konstituen alami, aman dan tepat digunakan untuk aplikasi di bidang medis. Kopolimer PHA menunjukkan pertumbuhan sel yang lebih baik dibandingkan dengan *poly lactic acid* (PLA) sehingga PHA menjadi bahan yang efisien dalam rekayasa jaringan (sebagai bahan pembuatan material tulang) karena memiliki sifat biokompatibel dengan sel tulang, sel epitel dan kondrosit, dan pengiriman obat (Pakalapati *et al.*, 2018). Di bidang biomedis, PHA digunakan untuk pembuatan produk kardiovaskuler (katup jantung, stent, cangkok vaskular), dalam sistem pengiriman obat (tablet, mikrokontroler untuk terapi kanker asing), dalam perawatan luka (jahitan, manset saraf, penyeka, tali pengikat), dalam ortopedi (lempeng tulang, tulang belakang) (Możejko-Ciesielska and Kiewisz, 2016).

Aplikasi PHA di bidang farmasi sudah sangat berkembang yaitu untuk sintesis bahan kimia bernilai tambah termasuk obat-obatan, antibiotik, aditif makanan, parfum, dan vitamin. Asam 3-hidroksioktanoat (3HO) juga menunjukkan aktivitas antimikroba. Asam 3-hidroksiheksanoat (3HHx) dapat digunakan

sebagai bahan baku untuk mensintesis *laulimalide* analog yang merupakan bahan kimia anti kanker. PHA juga dapat digunakan untuk mengembangkan nanopartikel yang mengandung *novel drug* untuk industri farmasi. PHA dapat digunakan untuk pelepasan obat-obatan yang berkelanjutan berbasis teknologi pelapisan suatu zat dengan bahan polimer menjadi partikel berukuran mikro (Mozejko-Ciesielska and Kiewisz, 2016). Peningkatan permintaan dan sifat-sifat penting PHA dalam obat-obatan dapat digunakan lebih lanjut untuk pemberian obat yang ditargetkan terutama pada kasus tumor (Pakalapati *et al.*, 2018).

Aplikasi bioplastik berbasis PHA sebagai bahan kemasan sangat sesuai untuk menggantikan plastik sintesis di masa mendatang. Penggunaan PHA sebagai bahan kemasan dapat mencegah kerusakan oksidatif produk karena bahan tersebut memiliki sifat penghalang yang baik. Kualitas bahan makanan yang dikemas menggunakan PHA relatif sama dengan yang dikemas menggunakan HDPE (Keskin *et al.*, 2017). Namun demikian, PHB lebih kaku dan kurang fleksibel dibandingkan polipropilen (PP). Kinerja PHB cenderung lebih rendah daripada PP dalam kondisi beku namun, pada suhu lebih tinggi PHB berkerja lebih baik dibandingkan PP. Kerapuhan PHB atau PHBV dapat dikurangi melalui pencampuran dengan bahan *biodegradable* lainnya meliputi pati, *polylactic acid* dan poli vinil alkohol (Koller, 2014; Khosravi-Darania and Bucci, 2015). Pencampuran PHB dengan plastisiser juga dapat mengurangi kerapuhan plastik. Plastisiser yang dapat digunakan meliputi gliserin teroksidasi (atau laprol), gliserol, gliserol triasetat, 4-nonylphenol, 4,4-dihydroxydiphenylmethane, asetil tributil sitrat, ester salisilat, ester asam asetilsalisilat, minyak kedelai, minyak kedelai teroksidasi, dibutil ftalat, trietil sitrat, dioktil phthalate, dioctyl sebacate, asetil tributil sitrat, di-2-ethylhexylphthalate, tri(etilena glikol)-bis(2-etilheksanoat), triasetin, dan alkohol lemak dengan atau tanpa ester gliserol, dan polietilen glikol (PEG) (Bugnicourt *et al.*, 2014).

Nanokomposit PHA yang diproduksi dengan bahan pengisi berukuran nano dapat bersaing dengan plastik berbasis petrokimia

(Keskin *et al.*, 2017). Bahan kompatibel yang berbeda juga dapat dimasukkan ke dalam matriks PHA sebagai nanopartikel. Nanopartikel berpotensi untuk meningkatkan sifat bahan seperti permeabilitas gas dan sifat termomekanis tertentu, sehingga memberikan kesempurnaan sifat-sifat bahan komposit. Selain itu, kemasan berbahan PHA juga dapat ditambahkan dengan senyawa yang memiliki aktivitas antimikroba (seperti asam sorbat dan asam benzoat), sehingga mendukung kinerja PHA dalam kemasan untuk produk makanan (Koller, 2014).

PELUANG DAN TANTANGAN PENGEMBANGAN BIOPLASTIK DARI PHA

Bioplastik sangat berpeluang dikembangkan disebabkan menipisnya cadangan bahan bakar fosil, sumber daya yang terbatas, dan polusi lingkungan. PHA dianggap sebagai pengganti plastik konvensional berdasarkan sifatnya yang *biodegradable* dan termoplastik (Kumar and Kim, 2018). PHA telah mendapatkan perhatian yang cukup besar dalam penelitian dan industri, namun, kelemahan utama dari biopolimer ini adalah biaya produksinya diperkirakan sekitar 15 kali lebih mahal dari polimer yang berasal dari minyak bumi seperti polipropilen (Mozejko-Ciesielska and Kiewisz, 2016). Meskipun biaya produksi bioplastik ini cukup mahal, aplikasi bioplastik ini dapat diarahkan untuk produk-produk spesifik yang memiliki nilai tambah tinggi khususnya di bidang kedokteran/biomedis dan farmasi (Mozejko-Ciesielska and Kiewisz, 2016).

Perancangan proses yang efisien meliputi pemilihan jenis bakteri yang tepat dan penggunaan sumber bahan baku yang murah seperti menggunakan bahan dan sumber limbah organik yang hemat biaya dapat dilakukan untuk meminimalisasi biaya produksi (Butt *et al.*, 2018). Penggunaan limbah pertanian sebagai sumber karbon untuk fermentasi merupakan bahan baku dari sumber daya terbarukan, yang membuat produksi PHA ramah lingkungan. Salah satu limbah dari sumber pertanian adalah limbah pengolahan minyak yang berasal dari tanaman (Ciesielski *et al.*, 2015).

INDUSTRI SAWIT SEBAGAI SUMBER BAHAN BAKU POLIHIDROKSIALKANOAT

Agroindustri minyak kelapa sawit tidak hanya menghasilkan minyak nabati yang paling banyak dikonsumsi di dunia, tetapi juga sejumlah besar biomassa yang berpeluang digunakan untuk berbagai produk (Garcia-Nunez *et al.*, 2016), seperti bahan bakar, arang aktif, dan produk kimia dari turunan selulosa dan lignin. Selain itu, industri kelapa sawit menghasilkan limbah cair yang tidak dapat dibuang langsung ke lingkungan dikarenakan nilai *chemical oxygen demand* (COD) dan *biological oxygen demand* (BOD) yang tinggi. Limbah cair ini dapat dijadikan sebagai sumber bahan organik mudah terdegradasi yang dapat dikonversi menjadi produk bernilai tambah seperti PHA (Mumtaz *et al.*, 2010). Persentase banyaknya limbah cair dan limbah padat (biomassa) dari tandan buah kelapa sawit yang dihasilkan di pabrik kelapa sawit disajikan pada Tabel 2. Limbah cair kelapa sawit merupakan sumber bahan baku yang sangat berpotensi dibandingkan biomassa lainnya seperti tandan kosong sawit, serat mesokarp dan cangkang. Limbah cair mengandung air 95-96%, minyak 0,6-0,7%, dan 4-5% total padatan (Mumtaz *et al.*, 2010).

Tabel 2. Persentasi limbah di pabrik kelapa sawit

| Limbah | Persentasi |
|---------------------------------|------------|
| Limbah cair pabrik kelapa sawit | 60,0 |
| Tandan kosong sawit | 23,0 |
| Serat mesokarp | 12,0 |
| Cangkang | 5,0 |

Sumber: Bakar *et al.* (2017)

Bahan baku yang dapat digunakan sebagai sumber PHA dari industri kelapa sawit meliputi minyak sawit, minyak inti sawit dan produknya, tandan kosong kelapa sawit, dan limbah cair pabrik kelapa sawit (Gambar 4). Jenis dan kadar PHA yang dihasilkan juga sangat beragam tergantung pada bahan baku, jenis mikroorganisme dan kondisi proses. Minyak sawit dan minyak inti sawit serta produknya dapat menghasilkan scl-PHA (3-5 atom karbon), mcl-PHA (6-14 atom karbon), atau kombinasi

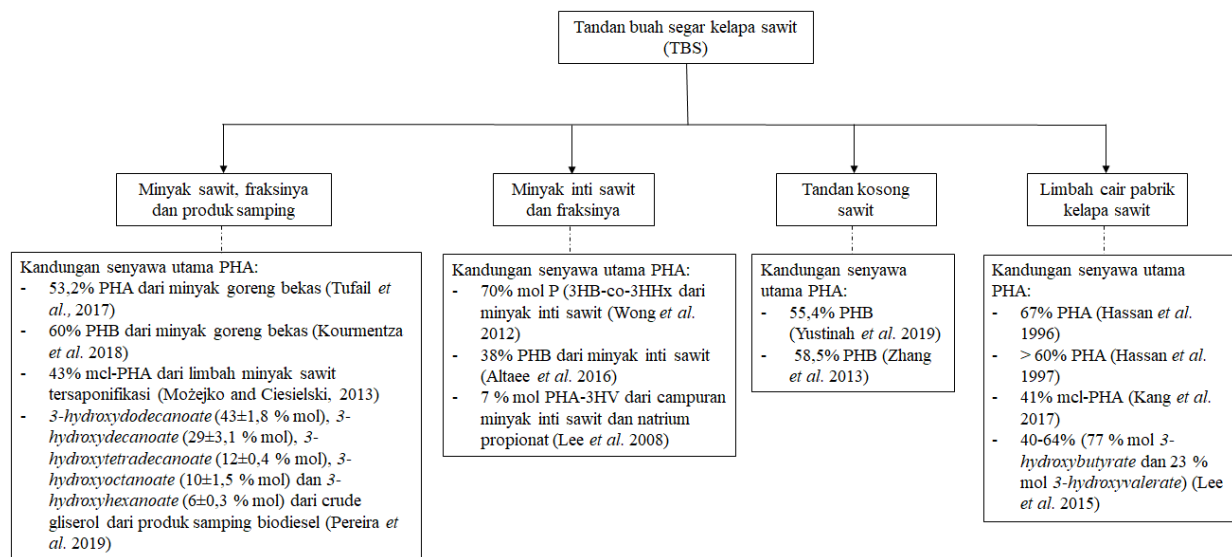
keduanya, PHB, P(3HB-co-3HV), P(3HB-co-4HB), P(3HB-co-3HHx), dan P(3HB-co-3HV-co-3HHx) (Sudesh *et al.*, 2011). Tandan kosong kelapa sawit dapat menghasilkan PHA berjenis PHB (Yustinah *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2013). Sementara itu, limbah cair kelapa sawit dapat menghasilkan PHB (*3-hydroxybutyrate*) dan PHV (*3-hydroxyvalerate*) (Lee *et al.*, 2015) dan mcl-PHA (Kang *et al.*, 2017).

PHA Berbasis Minyak Sawit, Minyak Inti Sawit dan Produk Samping

Minyak nabati dapat menghasilkan PHA lebih tinggi karena kandungan karbon per gram minyak lebih tinggi dibandingkan dengan gula. Penggunaan minyak nabati seperti minyak kedelai dan minyak sawit merupakan bahan baku potensial untuk produksi berbagai PHA. Minyak sawit telah dikaji secara ekstensif untuk produksi berbagai polimer PHA dengan sifat yang unik dengan hasil tinggi. Fraksi minyak sawit seperti minyak inti sawit mentah (*crude palm kernel oil*, CPKO) atau produk samping seperti *palm kernel acid oil* (PKAO) dan *palm acid oil* (PAO) serta minyak goreng bekas merupakan bahan baku yang secara kontinu dapat digunakan untuk produksi PHA (Sudesh *et al.*, 2011).

Alias and Tan (2005) menghasilkan PHA menggunakan minyak sawit fraksi olein atau olein sawit (sebagai sumber karbon) dan bakteri yang diisolasi dari POME (sebagai sumber bakteri), yang diinkubasi bersama dalam kultur media. Isolat bakteri yang memiliki sifat yang diinginkan tersebut adalah FLP1 yang diidentifikasi sebagai *Burkholderia cepacia*. Homopoliester P(3HB) dari olein sawit yang dihasilkan menggunakan FLP1 lebih tinggi dari fraksi minyak sawit lainnya seperti stearin sawit, minyak sawit, minyak inti sawit dan asam oleat. Ketika nomor ganjil asam lemak rantai pendek (valerat dan propionat) dimasukkan sebagai sumber karbon, FLP1 dapat menggabungkan 3-hidroksivalerat sebagai ko-monomer untuk menghasilkan P (3HBco-3HV) (Alias and Tan, 2005).

Kemampuan *Cupriavidus necator* untuk menghasilkan *poly (3-hydroxybutyrate-co-4*



Gambar 4. Kandungan senyawa utama PHA pada produk dan limbah industri kelapa sawit

hydroxybutyrate), P (3HB-co-4HB) pada substrat minyak goreng sawit telah diteliti oleh Rao *et al.* (2010). Hasil yang diperoleh yaitu fraksi mol unit 4-hidroksibutirat sebesar 15% mol. Tufail *et al.* (2017) juga melaporkan penggunaan substrat minyak goreng bekas yang dibandingkan dengan minyak kanola, diesel dan glukosa untuk menghasilkan PHA menggunakan enam strain bakteri seperti *Bacillus cereus* (KF270349), *Klebsiella pneumonia* (KF270350), *Bacillus subtilis* (KF270351), *Brevibacterium halotolerance* (KF270352), *Pseudomonomon aeruginosa* (KF270353). *P. aeruginosa* menghasilkan PHA paling maksimum pada kondisi proses meliputi waktu 72 jam, suhu 37 °C dan kecepatan pengadukan 100 rpm. PHA yang dihasilkan menggunakan minyak goreng bekas sebesar 53,2% sementara glukosa 37,8% dan minyak goreng 34,4%. Sementara itu, *B. cereus* menghasilkan PHA sebesar 40% menggunakan glukosa. Substrat diesel menghasilkan PHA dalam jumlah kecil (Tufail *et al.*, 2017). Selain itu, Kourmentza *et al.* (2018) juga melaporkan penggunaan minyak goreng bekas sebagai sumber karbon untuk produksi rhamnolipid dan PHA sekaligus menggunakan strain *Burkholderia thailandensis* yang mampu menghasilkan PHB hingga 60% dari berat kering sel.

Minyak inti sawit sebagai sumber karbon tunggal untuk produksi kopolimer P (3HB-co-

3HHx) yang mengandung fraksi monomer 3HHx tinggi menggunakan strain *Cupriavidus necator* rekombinan Re2160/pCB113 telah dikaji oleh Wong *et al.* (2012). Produk yang dihasilkan mengandung 3HHx sekitar 70% mol dan menunjukkan sifat mekanik yang lunak dan fleksibel (Wong *et al.*, 2012). Altaee *et al.* (2016) juga menggunakan substrat minyak inti sawit dengan bakteri gram positif *Rhodococcus equi* untuk menghasilkan PHB. Hasil yang diperoleh adalah biomassa kering 1,43 (g/l) dengan PHB 38%. Biopolimer yang dihasilkan memiliki titik leleh 173 °C, suhu transisi gelas (Tg) 2,79 °C, dan suhu dekomposisi (Td) 276 °C. Kombinasi minyak nabati dan prekursor 3-hidroksivalerat (3HV) untuk biosintesis kopolimer PHA yang mengandung monomer 3HV menggunakan *Cupriavidus necator* H16 telah dilaporkan oleh Lee *et al.* (2008). Di antara berbagai campuran minyak nabati dan prekursor 3HV, campuran minyak inti sawit dan natrium propionat cocok untuk biosintesis PHA konsentrasi tinggi (6,8 g/L) yang mengandung 3HV sebesar 7 % mol. Komposisi monomer 3HV dapat diatur dalam kisaran 0-23 % mol dengan mengubah parameter kultur seperti pH awal, dan sumber dan konsentrasi nitrogen (Lee *et al.*, 2008).

Sintesis (mcl-PHA) oleh *Pseudomonas sp.* GI01 menggunakan limbah minyak sawit tersaponifikasi telah dikaji oleh Możejko and

Ciesielski, (2013). Sebanyak 43% mcl-PHA diproduksi pada kondisi *Pseudomonas sp.* G101 yang ditanam selama 48 jam dalam biofermentor yang mengandung limbah minyak sawit tersaponifikasi 15 g/l. Dari penggunaan teknik PCR real-time menunjukkan bahwa gen *phaZ* dapat ditranskripsi bersama dengan gen *phaC1* atau *phaC2*, yang berarti bahwa sintesis dan degradasi PHA terjadi secara bersamaan (Mozejko and Ciesielski, 2013). Penggunaan crude gliserol dari produk samping biodiesel dengan menggunakan *Pseudomonas chlororaphis subsp. aurantiaca* (DSM 19603) juga dapat menghasilkan mcl-PHA, yang terdiri dari 3-*hydroxydodecanoate* (43±1,8% mol), 3-*hydroxydecanoate* (29±3,1% mol), 3-*hydroxytetradecanoate* (12±0,4% mol), 3-*hydroxyoctanoate* (10±1,5% mol) dan 3-*hydroxyhexanoate* (6±0,3% mol). PHA yang dihasilkan memiliki berat molekul rata-rata $1,1 \times 10^5$ Da, indeks polidispersitas 1,5, indeks kristalinitas $37 \pm 0,2\%$ (semi-kristal), titik leleh 44 °C, suhu transisi gelas -48 °C, dan stabil terhadap panas hingga 285 °C. Film biopolimer tersebut bersifat elastis dan *translucid*, bersifat hidrofobik dan memiliki permeabilitas yang relatif tinggi terhadap oksigen dan karbon dioksida (Pereira *et al.*, 2019).

PHA Berbasis Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit

Pengelolaan air limbah pabrik kelapa sawit dapat dilakukan melalui transformasi air limbah menjadi sumber daya yang bernilai tambah (Lee *et al.*, 2015). Hassan *et al.* (1996) melaporkan produksi PHA melalui dua tahap proses meliputi tahap satu, perlakuan anaerob limbah cair untuk mendapatkan asam organik, terutama asam asetat dan asam propionat. Tahap dua, asam organik dikonversi menjadi PHA oleh bakteri fototrofik, *Rhodobacter sphaeroides* (IF0 12203). Selama pengolahan anaerob limbah cair, asam format terbentuk ketika pH dipertahankan kurang dari 4 dan pada pH yang berbeda profil asam organik yang berbeda akan diperoleh. Dengan tidak adanya asam format, hasil PHA 0,50 g/g dan kadar PHA dalam sel diperoleh sebesar 67%. Peningkatan konsentrasi asam format menyebabkan hasil dan kadar PHA turun masing-masing menjadi 0,21 dan 18 kali. Dengan

demikian, pH harus dijaga pada pH 7 agar diperoleh hasil PHA yang tinggi (Hassan *et al.*, 1996). PHA terus diproduksi setelah pembuangan lumpur. Pada tingkat pengenceran 0,072 d⁻¹, lebih dari 1,0 g PHA dapat diperoleh dari limbah cair yang diolah secara anaerob yang mengandung 5,5 g/L asam organik (> 30% dari berat sel kering). Pada tingkat pengenceran 0,024 d⁻¹, lebih dari 2 g PHA Z dapat diperoleh dari limbah yang mengandung 15 g/L asam organik (>60% dari berat sel kering) (Hassan *et al.*, 1997). Dalam penelitian lain, Kang *et al.* (2017) mensintesis PHA dari *sludge palm oil* menggunakan strain *Pseudomonas*, dimana *Pseudomonas putida* S12 menghasilkan elastomer mcl-PHA yang tinggi (~ 41%).

Sementara itu, pengayaan organisme yang mengakumulasi PHA melalui proses aerobik efektif dan signifikan meningkatkan kapasitas penyimpanan PHA sebesar 4% dari berat lumpur/limbah menjadi 40-64% dari berat lumpur/limbah. Lumpur yang dibudidayakan mengandung 42±12% *Betaproteobacteria*, 35±7% *Alphaproteobacteria* dan 13±4% *Gammaproteobacteria*. PH netral adalah pH yang optimal untuk produksi PHA. PHA yang dihasilkan terdiri atas 77 % mol 3-*hydroxybutyrate* dan 23 % mol 3-*hydroxyvalerate* (Lee *et al.*, 2015). Produksi dan penyimpanan PHA yang tinggi menggunakan limbah cair dengan sistem *batch* Bio-PORec_ laboratorium dalam kondisi aerobik juga diselidiki oleh Din *et al.* (2012). Hasilnya menunjukkan bahwa PHA maksimum diperoleh pada laju spesifik 0,343 C-mol/C-mol jam ketika suplai udara pada 20 ml/menit. Hasil PHA ditemukan menjadi 0,80 C-mol/C-mol asam asetat (HAc) pada kondisi mikroaerofilik dan perhitungan keseimbangan massa menunjukkan bahwa produksi PHA meningkat hingga 15,68 ± 2,15 C-mmol/siklus (Din *et al.*, 2012). Penelitian produksi PHA dari limbah cair kelapa sawit di Indonesia telah dikembangkan oleh Kresnawaty *et al.*, (2014a:2014b). Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa isolat LC-505 yaitu *Bacillus subtilis* dari limbah cair pabrik kelapa sawit mampu mengakumulasi PHA sebesar 9,44% dari berat sel kering (Kresnawaty *et al.*, 2014a). Produksi optimum PHA diperoleh pada konsentrasi limbah cair 50-25% dan waktu inkubasi 6 hari (Kresnawaty *et al.*, 2014b).

PHA Berbasis Tandan Kosong Sawit

Tandan kosong kelapa sawit (*oil palm empty fruit bunch*, OPEFB) mengandung banyak selulosa dan hemiselulosa yang dapat digunakan sebagai sumber daya terbarukan untuk bahan bakar (briket dan bahan bakar di pabrik kelapa sawit) dan produksi bahan kimia (mikro dan nano kristal selulosa). Zhang *et al.* (2013) melaporkan potensi tandan kosong sawit sebagai bahan PHB melalui perubahan turunan gula menggunakan strain *B. megaterium*. Hasil yang diperoleh yaitu kadar dan produksi PHB mencapai 58,5% (9,32 g/L pada gula 45 g/L OPEFB). Selain itu, Yustinah *et al.* (2019) membandingkan potensi PHB dari glukosa dan hidrolisat OPEFB (hasil hidrolisis asam) menggunakan *Bacillus cereus suaeda* B-001. Sumber karbon glukosa pada 15 g/L dapat menghasilkan PHB 43,1%, sedangkan penggunaan OPEFB hidrolisat pada 20 g/L menghasilkan PHB 55,4%. Hasil ini menunjukkan bahwa hidrolisat OPEFB dari proses hidrolisis asam dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku yang cocok dan murah untuk produksi PHB.

Menurut Zahari *et al.* (2015) bahwa gula non pangan yang terbarukan sebanyak 99.780 ton/tahun dapat diproduksi dari 10 pabrik kelapa sawit (masing-masing kapasitas produksi rata-rata sebesar 200.000 ton/tahun TBS). Dengan 20.000 ton/tahun produksi P (3HB), biaya produksi P (3HB) menggunakan gula non pangan yang dapat diperbarui dari tandan kosong sawit diperkirakan \$ 3,44/kg P(3HB). Nilai ini lebih rendah 41% dibandingkan dengan yang dihasilkan dari glukosa komersial dan sedikit lebih tinggi dari perkiraan biaya produksi PHA dari limbah cair pabrik kelapa sawit (Zahari *et al.*, 2015).

Peluang PHA Berbasis Pati dari Batang Kelapa Sawit

Batang kelapa sawit merupakan biomassa padat di perkebunan kelapa sawit. Jumlah batang kelapa sawit terus meningkat seiring program peremajaan perkebunan kelapa sawit di Indonesia. Batang kelapa sawit mengandung kadar pati tinggi (Cahyaningtyas *et al.*, 2019). Ridwansyah *et al.* (2007) melaporkan bahwa ekstraksi batang kelapa sawit dapat

menghasilkan sekitar 4,7% pati. Pati telah banyak dilaporkan sebagai sumber bahan baku untuk substrat dalam produksi PHA. Syamsu *et al.* (2007) melaporkan bahwa pati sagu terhidrolisis dapat digunakan sebagai substrat untuk produksi PHA menggunakan *Ralstonia eutropha*, yang menghasilkan produk hingga 76,54% dan konsentrasi produk hingga 3,72 g/L. Selain itu, Krueger *et al.* (2012) mengkonversi pati singkong terhidrolisis menjadi P(3HB) dengan kadar 29,7%. Namun demikian, penggunaan pati dari batang kelapa sawit belum banyak dieksplorasi untuk menghasilkan PHA, sehingga berpeluang untuk dikembangkan.

KESIMPULAN

Polihidroksialkanoat (PHA) adalah plastik yang dapat terurai secara hayati yang disintesis oleh beragam bakteri dari substrat termasuk gula dan asam lemak. PHA dapat dihasilkan melalui jalur biosintesis karbohidrat (melalui jalur asetil koA) dan β oksidase asam lemak dan sintesis asam lemak De Novo. Monomer PHA yang dihasilkan sangat tergantung pada mikroorganisme, sumber karbon dan kondisi kulturnya. PHA berpeluang untuk menggantikan plastik sintesis untuk bahan kemasan. Peningkatan sifat fisik dari PHA dalam pembuatan bioplastik untuk bahan kemasan dapat dilakukan dengan pencampuran dengan bahan polimer yang *biodegradable*, plastisiser, dan antimokroba.

Limbah cair dan padat dari pabrik kelapa sawit merupakan bahan baku yang potensial untuk produksi PHA karena limbah cair mengandung asam-asam lemak sementara itu, limbah padat berupa tandan kosong sawit mengandung selulosa yang dapat dikonversi menjadi gula pereduksi. Jenis PHA yang dihasilkan dari limbah cair dan padat dari industri kelapa sawit sangat tergantung dari substrat dan bakteri yang digunakan. Jumlah PHA yang dapat dihasilkan dari limbah cair dan padat masing-masing mencapai 67% dan 58,5%.

Produksi PHA masih terkendala karena biaya produksi yang relatif lebih mahal dibandingkan plastik konvensional. Namun demikian, strategi untuk mempercepat hilirisasi

bioplastik ini dapat dilakukan melalui: (1) penggunaan teknologi pengolahan limbah cair dan padat dari pabrik kelapa sawit secara terintegrasi, (2) penggunaan bakteri yang tepat untuk mengakumulasi PHA dari limbah cair (*Rhodobacter sphaeroides*, *Delftia tsuruhatensis* Bet002, *Betaproteobacteria*, *Alphaproteobacteria*, *Gammaproteobacteria*), dan limbah padat (*B. megaterium*, *Bacillus cereus suaeda* B-001), dan (3) pemanfaatan PHA pada produk yang memiliki nilai tambah tinggi seperti produk biomedis dan farmasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Akinmulewo, A.B. and O.C. Nwinyi. 2019. Polyhydroxyalkanoate: a biodegradable polymer (a mini review). *Journal of Physics: Conference Series*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1378/4/042007>
- Alias, Z. and I.K.P. Tan. 2005. Isolation of palm oil-utilising, polyhydroxyalkanoate (PHA)-producing bacteria by an enrichment technique. *Bioresource Technology* 96(11): 1229–1234. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.10.012>
- Altaee, N., A. Fahdil, E. Yousif, and K. Sudesh. 2016. Recovery and subsequent characterization of polyhydroxybutyrate from *Rhodococcus equi* cells grown on crude palm kernel oil. *Journal of Taibah University for Science* 10(4): 543–550. <https://doi.org/10.1016/j.jtusci.2015.09.003>
- Arikan, E.B. and H.D. Ozsoy. 2015. A review: investigation of bioplastics. *Journal of Civil Engineering and Architecture* 9: 188-192. <https://doi.org/10.17265/1934-7359/2015.02.007>
- Bakar, S.N.H.A., H.A. Hasan, A.W. Mohammad, S.R.S. Abdullah, T.Y. Haan, R. Ngteni, and K.M.M. Yusof. 2017. A review of moving-bed biofilm reactor technology for palm oil mill effluent treatment. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.100>
- Bugnicourt, E., P. Cinelli, A. Lazzeri, and V. Alvarez. 2014. Polyhydroxyalkanoate (PHA): review of synthesis, characteristics, processing and potential applications in packaging. *eXPRESS Polymer Letters* 8(11): 791–808. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2014.82>
- Butt, F.I., N. Muhammad, A. Hamid, M. Moniruzzaman, and F. Sharif. 2018. Recent progress in the utilization of biosynthesized polyhydroxyalkanoates for biomedical applications – Review. *International Journal of Biological Macromolecules* 120: 1294–1305. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.09.002>
- Cahyaningtyas, A.A., R. Ermawati, G. Supeni, F.A. Syamani, N. Masruchin, W.B. Kusumaningrum, D.A. Pramasari, T. Darmawan, Ismadi, E.S. Wibowo, D. Triwibowo, dan S.S. Kusumah. 2019. Modifikasi dan karakterisasi pati batang kelapa sawit secara hidrolisis sebagai bahan baku bioplastik. *Jurnal Kimia dan Kemasan* 41(1): 37-44. <https://doi.org/10.24817/jkk.v41i1.4623>
- Castilho, L.R., D.A. Mitchell, and D.M.G. Freire. 2009. Production of polyhydroxyalkanoates (PHAs) from waste materials and by-products by submerged and solid-state fermentation. *Bioresource Technology* 100(23): 5996–6009. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.088>
- Ciesielski, S., J. Mozejko, and N. Pisutpaisal. 2015. Plant oils as promising substrates for polyhydroxyalkanoates production. *Journal of Cleaner Production* 106: 408–421. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.040>
- Coles, R., M. Kay, and J. Song. 2011. Bioplastics. In R. Coles and M. Kirwan (Eds.) *Food and Beverage Packaging Technology*. Blackwell Publishing Ltd.
- Din, M.F.M., P. Mohanadoss, Z. Ujang, M.V. Loosdrecht, S.M. Yunus, S. Chelliapan, V. Zambare, and G. Olsson. 2012. Development of bio-PORec system for polyhydroxyalkanoates (pha) production and its storage in mixed cultures of palm oil mill effluent (POME). *Bioresource Technology* 124: 208-216. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.036>

- Garcia-Nunez, J.A., N.E. Ramirez-Contreras, D.T. Rodriguez, E. Silva-Lora, C.S. Frear, C. Stockle, and M. Garcia-Perez. 2016. Evolution of palm oil mills into bio-refineries: Literature review on current and potential uses of residual biomass and effluents. *Resources, Conservation and Recycling* 110: 99–114. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.022>
- Garside, M. 2019. Global plastic production statistics. Diakses pada 9 Juni 2020, dari <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>
- Gumel, A.M., M.S.M. Anuar, and T. Heidelberg. 2012. Effects of carbon substrates on biodegradable polymer composition and stability produced by *Delftia tsuruhatensis* Bet002 isolated from palm oil mill effluent. *Polymer Degradation and Stability* 97(8): 1224–1231. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.05.041>
- Hassan. M.A., Y. Shiral, N. Kusubayashi, M.I.A. Karim, K. Nakanishi, and K. Hashimoto. 1996. Effect of organic acid profiles during anaerobic treatment of palm oil mill effluent on the production of polyhydroxyalkanoates by *Rhodobacter sphaeroides*. *Journal of Fermentation and Bioengineering* 82(2): 151-156
- Hassan, M.A, Y. Shirai, N. Kusubayashi, M.I.A. Karim, K. Nakanishi, and K. Hashimoto. 1997. The production of polyhydroxyalkanoates from anaerobically treated palm oil mill effluent by *Rhodobacter sphaeroides*. *Journal of fermentation and Bioengineering* 83(5): 485-488
- Imperial Chemical Industries. 1990. Bioproducts and Fine Chemicals, Biopolymers Group, Billingham, England. BIOPOL nature's plastic fully biodegradable, the changing world of plastics. ICI information leaflet, Billingham
- Ivanov, V., V. Stabnikov, Z. Ahmed, S. Dobrenko, and A. Saliuk. 2015. Production and applications of crude polyhydroxyalkanoate-containing bioplastic from the organic fraction of municipal solid waste. *International Journal of Environmental Science and Technology* 12(2): 725–738. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0505-3>
- Jacquel, N., C.W. Lo, Y.H. Wei, H.S. Wu, and S.S. Wang. 2008. Isolation and purification of bacterial poly(3-hydroxyalkanoates). *Biochemical Engineering Journal* 39: 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2007.11.029>
- Jiang, G., D.J. Hill, M. Kowalczyk, B. Johnston, G. Adamus, V. Irorere, and I. Radecka. 2016. Carbon sources for polyhydroxyalkanoates and an integrated biorefinery. *Int. J. Mol. Sci.* 17. <https://doi.org/10.3390/ijms17071157>
- Kamsiati, E., H. Herawati, dan E.Y. Purwani. 2017. Potensi pengembangan plastik biodegradable berbasis pati sagu dan ubikayu di Indonesia. *Jurnal Litbang Pertanian* 36(2): 67-76. <https://dx.doi.org/10.21082/jp3.v36n2.2017.p67-76>
- Kang, D.-K., C.-R. Lee, S.H. Lee, J.-H. Bae, Y.-K. Park, Y.H. Rhee, B.H. Sung, and J.-H. Sohn. 2017. Production of polyhydroxyalkanoates from sludge palm oil using *Pseudomonas putida* S12. *Journal of Microbiology and Biotechnology* 27(5): 990–994. <https://doi.org/10.4014/jmb.1612.12031>
- Keshavarz, T. and I. Roy. 2010. Polyhydroxyalkanoates: bioplastics with a green agenda. *Current Opinion in Microbiology* 13(3): 321–326. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2010.02.006>
- Keskin, G., G. Kızıl, M. Bechelany, C. Pochat-Bohatier, and M. Oner. 2017. Potential of polyhydroxyalkanoate (PHA) polymers family as substitutes of petroleum based polymers for packaging applications and solutions brought by their composites to form barrier materials. *Pure Appl. Chem.* 89(12): 1841–1848. <https://doi.org/10.1515/pac-2017-0401>
- Khosravi-Darani, K. and D.Z. Bucci. 2015. Application of poly(hydroxyalkanoate) in food packaging: improvements by nanotechnology. *Chem. Biochem. Eng. Q.* 29(2): 275–285. <https://doi.org/10.15255/CABEQ.2014.2260>

- Koller, M. 2014. Poly(hydroxyalkanoates) for food packaging: application and attempts towards implementation. *Applied Food Biotechnology* 1(1): 3-15
- Kourmentza, C., J. Costa, Z. Azevedo, C. Servin, C. Grandfils, V. De Freitas, and M.A.M. Reis. 2018. *Burkholderia thailandensis* as a microbial cell factory for the bioconversion of used cooking oil to polyhydroxyalkanoates and rhamnolipids. *Bioresource Technology* 247: 829–837. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.138>
- Kourmentza, C. and M. Kornaros. 2016. Biotransformation of volatile fatty acids to polyhydroxyalkanoates by employing mixed microbial consortia: the effect of pH and carbon source. *Bioresource Technology* 222: 388–398. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.014>
- Kresnawaty, I., H.T. Prakoso, D.D. Eris, and A.S. Mulyatni. 2014a. Penapisan bakteri penghasil bioplastik polihidroksialkanoat dari tanah tempat pembuangan sampah dan limbah cair pabrik kelapa sawit. *Menara Perkebunan* 82: 25-31
- Kresnawaty, I., A.S. Mulyatni, D.D. Eris, and H.T. Prakoso. 2014b. Karakterisasi PHA dari *Pseudomonas aeruginosa* dan *Bacillus subtilis* yang ditumbuhkan dalam media limbah cair pabrik kelapa sawit. *Menara Perkebunan* 82: 57-63
- Krueger, C.L., C.M. Radetski, A.G. Bendia, I.M. Oliveira, M.A. Castro-Silva, C.R. Rambo, R.V. Antonio, and A.O.S. Lima. 2012. Bioconversion of cassava starch by-product into *Bacillus* and related bacteria polyhydroxyalkanoates. *Electronic Journal of Biotechnology*. <https://doi.org/10.2225/vol15-issue3-fulltext-6>
- Kumar, S. and K.S. Thakur 2017. Bioplastics - classification, production and their potential food applications. *Journal of Hill Agriculture* 8: 118-129. <https://doi.org/10.5958/2230-7338.2017.00024.6>
- Kumar, P. and B.S. Kim. 2018. Valorization of polyhydroxyalkanoates production process by co-synthesis of value-added products. *Bioresource Technology* 269: 544–556. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.120>
- Kunasundari, B. and K. Sudesh. 2011. Isolation and recovery of microbial polyhydroxyalkanoates. *eXPRESS Polymer Letters* 5(7): 620–634. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2011.60>
- Lee, W.S., A.S.M. Chua, H.K. Yeoh, T. Nittami, and G.C. Ngoh. 2015. Strategy for the biotransformation of fermented palm oil mill effluent into *biodegradable* polyhydroxyalkanoates by activated sludge. *Chemical Engineering Journal* 269: 288–297. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.01.103>
- Lee, W.-H., C.-Y. Loo, C.T. Nomura, and K. Sudesh. 2008. Biosynthesis of polyhydroxyalkanoate copolymers from mixtures of plant oils and 3-hydroxyvalerate precursors. *Bioresource Technology* 99(15): 6844–6851. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.01.051>
- Matavuly, M., and H.P. Molitoris. 2015. *In vitro* degradation of poly[(r)-3-hydroxybutyrate] and BIOPOL™ by marine-derived fungi. *Biologia Serbica* 37: 49-63
- Melanie, S., J.B. Winterburn, and H. Devianto. 2018. Production of biopolymer polyhydroxyalkanoates (PHA) by extreme halophilic marine *Archaea Haloferax mediterranei* in medium with varying phosphorus concentration. *J. Eng. Technol. Sci.* 50(2): 255-271. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2017.50.2.7>
- Możejko, J. and S. Ciesielski. 2013. Saponified waste palm oil as an attractive renewable resource for mcl-polyhydroxyalkanoate synthesis. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 116(4): 485–492. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2013.04.014>
- Możejko-Ciesielska, J. and R. Kiewisz. 2016. Bacterial polyhydroxyalkanoates: Still fabulous?. *Microbiological Research* 192: 271–282. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2016.07.010>
- Mumtaz, T., N.A. Yahaya, S. Abd-Aziz, N. Abdul Rahman, P.L. Yee, Y. Shirai, and M.A. Hassan. 2010. Turning waste to wealth-

- biodegradable plastics polyhydroxyalkanoates from palm oil mill effluent – a Malaysian perspective. *Journal of Cleaner Production* 18(14): 1393–1402. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.05.016>
- Pakalapati, H., C.-K. Chang, P.L. Show, S.K. Arumugasamy, and J.C.-W. Lan. 2018. Development of polyhydroxyalkanoates production from waste feedstocks and applications. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 126(3): 282–292. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2018.03.016>
- Pereira, J.R., D. Araújo, A.C. Marques, L.A. Neves, C. Grandfils, C. Sevrin, V.D. Alves, E. Fortunato, M.A.M. Reis, and F. Freitas. 2019. Demonstration of the adhesive properties of the medium-chain-length polyhydroxyalkanoate produced by *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *Aurantiaca* from glycerol. *International Journal of Biological Macromolecules* 122: 1144–1151. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.09.064>
- Rai, R., T. Keshavarz, J.A. Roether, A.R. Boccaccini, and I. Roy. 2011. Medium chain length polyhydroxyalkanoates, promising new biomedical materials for the future. *Materials Science and Engineering: R: Reports* 72(3): 29–47. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2010.11.002>
- Rao, U., R. Sridhar, and P.K. Sehgal. 2010. Biosynthesis and biocompatibility of poly(3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate) produced by *Cupriavidus necator* from spent palm oil. *Biochemical Engineering Journal* 49(1): 13–20. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2009.11.005>
- Raza, Z.A., S. Abid, and I.M. Banat. 2018. Polyhydroxyalkanoates: characteristics, production, recent developments and applications. *International Biodeterioration and Biodegradation* 126: 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.10.001>
- Ridwansyah, M.Z. Nasution, T.C. Sunarti, dan A.M. Fauzi. 2007. Karakteristik sifat fisiko-kimia pati kelapa sawit. *J. Tek. Ind. Pert.* 17(1):1-6
- Shen, L., E. Worrell, and M. Patel. 2010. Present and future development in plastics from biomass. *Biofuels Bioprod. Bioref.* 4: 25–40
- Sudesh, K., K. Bhubalan, J.-A. Chuah, Y.-K. Kek, H. Kamilah, N. Sridewi, and Y.-F. Lee. 2011. Synthesis of polyhydroxyalkanoate from palm oil and some new applications. *Applied Microbiology and Biotechnology* 89(5): 1373–1386. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3098-5>
- Syamsu, K., A.M. Fauzi, L. Hartoto, A. Suryani, dan N. Atifah. 2007. Pemanfaatan hidrolisat pati sagu sebagai sumber karbon untuk memproduksi bioplastik polihidroksi alkanoat (PHA) oleh *ralstonia eutropha* pada sistim kultivasi fed batch. *Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia* 9(1): 17-21
- Tripathi, A.D., T. Joshi, K. Khosravi-Darani, M. Koller, S.P. Singh, A. Shrivastava, and S. Mishra. 2016. Recovery and characterization of polyhydroxyalkanoates. *Recent Advances in Biotechnology* 2: 267-303
- Tufail, S., S. Munir, and N. Jamil. 2017. Variation analysis of bacterial polyhydroxyalkanoates production using saturated and unsaturated hydrocarbons. *Brazilian Journal of Microbiology* 48(4): 629–636. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2017.02.008>
- Urtuvia, V., P. Villegas, M. González, and M. Seeger. 2014. Bacterial production of the biodegradable plastics polyhydroxyalkanoates. *International Journal of Biological Macromolecules* 70: 208–213. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.06.001>
- Varsha, Y.M. and R. Savitha 2011. Overview on polyhydroxyalkanoates: a promising Biopol. *J Microbial Biochem Technol* 3(5): 099-105. <https://doi.org/10.4172/1948-5948.1000059>
- Wong, Y.-M., C.J. Brigham, C. Rha, A.J. Sinskey, and K. Sudesh. 2012. Biosynthesis and characterization of polyhydroxyalkanoate containing high 3-hydroxyhexanoate monomer fraction from crude palm kernel oil by recombinant *Cupriavidus necator*. *Bioresource Technology* 121: 320–327.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.015>

- Yustinah, N. Hidayat, R. Alamsyah, A.M. Roslan, H. Hermansyah, and M. Gozan. 2019. Production of polyhydroxybutyrate from oil palm empty fruit bunch (OPEFB) hydrolysates by *Bacillus cereus* suaeda B-001. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 18: 101-19. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.01.057>
- Zahari, M.A.K.M., H. Ariffin, M.N. Mokhtar, J. Salihon, Y. Shirai, and M.A. Hassan. 2015.

Case study for a palm biomass biorefinery utilizing renewable non-food sugars from oil palm frond for the production of poly(3-hydroxybutyrate) bioplastic. *Journal of Cleaner Production* 87: 284–290. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.010>

- Zhang, Y., W. Sun, H. Wang, and A. Geng. 2013. Polyhydroxybutyrate production from oil palm empty fruit bunch using *Bacillus megaterium* R11. *Bioresource Technology* 147: 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.029>