

PRODUKSI BIOPLASTIK (POLIHIDROKSIALKANOAT) SEBAGAI KERAJINAN ELEMEN INTERIOR DAN FASHION STUFF DARI LIMBAH CAIR INDUSTRI TAPIOKA

Fahmi Arifan¹⁾, M. Endy Yulianto¹⁾, dan M. Arief Budihardjo²⁾

¹⁾ Jurusan Teknik Kimia PSD III, UNDIP Semarang

²⁾ Jurusan Teknik Lingkungan, UNDIP Semarang

Jl. Prof Sudarto SH, Pedalangan Tembalang, Semarang 50239

E-mail : fahmiarifan@yahoo.com

Abstrak

Salah satu upaya yang dilakukan untuk mengatasi masalah yang ditimbulkan oleh sampah plastik adalah dengan membuat material plastik yang dapat didegradasi, antara lain dengan memanfaatkan limbah cair industri tapioka yang memiliki kandungan zat-zat organik (C, H, O, N, S). Adanya zat-zat ini dapat dimanfaatkan dengan pengolahan secara fermentasi menggunakan mikroorganisme lumpur aktif menjadi plastik yang terdegradasi. Jenis plastik yang terbentuk dalam proses ini adalah Polihidroksialkanoat (PHA). PHA dapat terdegradasi sempurna dan memiliki sifat yang mirip dengan kelebihan yang dimiliki oleh plastik konvensional. Tujuan penelitian adalah mengembangkan produksi bioplastik (PHA) melalui proses fermentasi limbah cair industri tapioka dengan menggunakan mikroba dari lumpur aktif pabrik tekstil dan aplikasinya sebagai kerajinan elemen interior dan fashion stuff. Kegiatan yang dilakukan meliputi: studi produktivitas polihidroksialkanoat (PHA), optimisasi parameter-parameter proses, aplikasi bioplastik untuk kerajinan asesoris, dan analisa tekno-ekonomi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi relatif baik diperoleh pada perendaman 2 jam dengan rekoveri PHA sebesar 61,5%. Sedangkan variabel proses yang paling berpengaruh adalah konsentrasi nitrogen. Kondisi optimum untuk rekoveri PHA dicapai pada konsentrasi nitrogen sebesar 4 mg/L, konsentrasi fosfor 2 mg/L, konsentrasi oksigen 5 mg/L dan rasio aerob-anaerob pada 1:4. Biaya pokok untuk produksi sebuah asesoris yang dibuat dari campuran limbah plastik bekas dan plastik biodegradabel adalah cukup rendah yaitu Rp.17.681, sedangkan nilai BEP nya adalah 454.44 unit pertahun. Melihat nilai BEP yang cukup rendah, maka asesoris dari limbah plastik dan plastik biodegradabel cukup layak untuk diproduksi secara komersial.

Kata Kunci: bioplastik, kerajinan asesoris, limbah tapioka

Pendahuluan

Salah satu sektor dalam kegiatan pembangunan adalah kegiatan industri. Kegiatan ini di beberapa sisi memberi berbagai manfaat dalam kehidupan manusia, namun ada sisi lain yang dianggap dapat menimbulkan akibat yang merugikan yaitu adanya limbah industri yang dapat mencemari lingkungan. Salah satunya adalah limbah cair industri tapioka.

Plastik merupakan salah satu penemuan dibidang kimia yang menjadikan hidup manusia lebih mudah. Penggunaan plastik yang semakin meluas disebabkan oleh kelebihan yang dimilikinya, yaitu plastik mudah dibuat dalam berbagai bentuk dan ukuran, mempunyai ketahanan kimia yang tinggi, dapat diatur keelastisannya, murah, dan dapat bertahan untuk waktu yang lama. Namun, kelebihan ini pula yang menjadikan plastik sebagai salah satu polutan yang sangat besar pengaruhnya. Karena murah, orang membuang plastik dengan mudah dan menjadikannya tumpukan sampah yang sulit dihancurkan oleh alam. Sebagai gambaran, diperkirakan lebih dari 100 juta ton plastik diproduksi setiap tahun di seluruh dunia. Konsumsi plastik di India adalah 2 kg per orang per tahun, sementara di Eropa 60 kg per orang per tahun dan di Amerika 80 kg per orang per tahun. Hal ini menyebabkan sampah plastik terakumulasi sebanyak 25 juta ton per tahun [Jogdand, 2000].

Salah satu upaya yang dilakukan untuk mengatasi masalah yang ditimbulkan oleh plastik adalah dengan membuat material plastik yang dengan mudah dapat diuraikan oleh alam. Plastik semacam ini dinamakan plastik biodegradabel. Jenis plastik ini sangat sesuai dengan siklus karbon alami, karena ketika dibuang ke lingkungan dan didegradasi oleh mikroorganisme diperoleh hasil CO₂. Peristiwa biodegradasi dapat terjadi di semua lingkungan, baik pada kondisi aerob maupun anaerob, dan di dalam tubuh hewan. Dan bila plastik biodegradabel dibakar, hasil pembakaran tersebut bukan merupakan senyawa beracun.

Polihidroksialkanoat (PHA) adalah salah satu jenis plastik biodegradabel yang termasuk dalam kelompok poliester. PHA dapat terdegradasi sempurna dan memiliki sifat yang mirip dengan kelebihan yang dimiliki oleh

plastik konvensional. Nilai tambah PHA dibandingkan dengan plastik biodegradabel lain adalah bahan bakunya selalu dapat diperbaharui (*renewable*), seperti glukosa dan asam lemak volatil. PHA dapat dihasilkan dari bermacam-macam bakteri, seperti *Alcaligenes latus*, *Pseudomonas oleovorans* dan *Escherichia coli*. Masing-masing bakteri akan menghasilkan PHA dengan komposisi yang berbeda.

Pada industri pangan dengan skala besar, sedang maupun kecil, limbah yang dihasilkan banyak mengandung zat-zat organik (C, H, O, N, S) yang berasal dari bahan baku yang mengandung karbohidrat, protein, dan lemak. Apabila air tercemar zat organik, maka akan mengakibatkan keadaan menjadi aerob dan menimbulkan bau busuk. Upaya untuk mengatasi pencemaran lingkungan yang diakibatkan oleh industri pangan berbasis tepung terigu adalah dengan mengolah limbah tersebut menjadi bahan yang bernilai guna, yaitu plastik *biodegradable* (PHA).

Produksi PHA saat ini semakin berkembang luas karena kebutuhan plastik yang 'ramah lingkungan' semakin meningkat. Namun, pemakaian PHA sebagai material pengganti plastik konvensional dibatasi oleh harga jual yang sangat mahal. Kendala ini berasal dari biaya produksi yang cukup tinggi, terutama biaya untuk memenuhi kebutuhan substrat dan biaya pemurnian PHA. Untuk menekan biaya substrat dilakukan upaya pemanfaatan substrat yang selama ini terbuang, yaitu bahan-bahan organik yang terdapat dalam limbah industri (Achmad, dkk., 2008).

Pemanfaatan limbah industri pangan merupakan suatu alternatif dalam memproduksi PHA, mengingat limbah tersebut merupakan sumber karbon yang berpotensi menghasilkan kopolimer PHA. Pengolahan limbah secara biologis ini menggunakan sistem lumpur aktif yang mengandung bermacam-macam mikroorganisme. Selain dapat menghasilkan PHA dengan biaya substrat rendah, cara ini dapat mengurangi lumpur hasil pengolahan limbah dengan sistem lumpur aktif. *Sequencing batch reactor* (SBR) sebagai salah satu modifikasi sistem lumpur aktif diharapkan mampu mengatasi kelemahan sistem lumpur aktif konvensional, sehingga PHA dapat terakumulasi semaksimal mungkin. Oleh karenanya, perlu menelaah pengolahan limbah cair menjadi PHA pada kondisi optimumnya sebelum proses ini diterapkan secara komersial.

Metode

Penelitian tentang pembuatan *polihidroksialkanoat* melalui reaksi fermentasi limbah cair industri tapioka dalam *sequencing batch reactor* diinvestigasi secara eksperimen. Rangkaian penelitian dilaksanakan secara bertahap meliputi: studi pendahuluan *polihidroksialkanoat* (PHA) dan penentuan parameter-parameter proses.

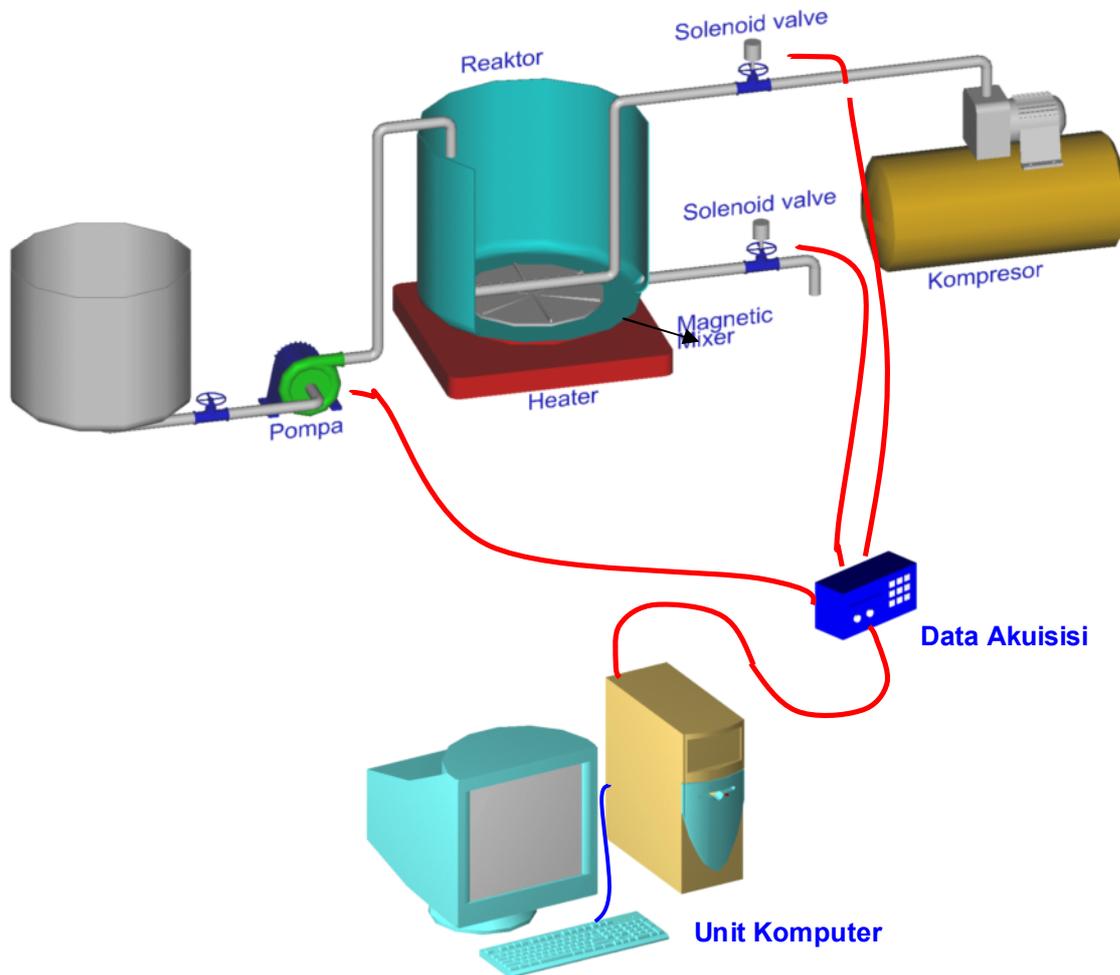
Bahan penelitian

Bahan baku yang digunakan pada penelitian ini adalah limbah sintentis industri tapioka dan bahan-bahan untuk keperluan analisa seperti: metanol, kloroform, kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$), air demin, ferro amonium sulfat (FAS), 1,10-phenanthroline monohydrate, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, H_2SO_4 , Ag_2SO_4 , dan $HgSO_4$. Bahan-bahan kimia ini membeli dari Bratachem Semarang. Selain itu digunakan lumpur aktif yang berasal dari limbah tekstil PT. Apac Inti Ungaran.

Peralatan penelitian

Peralatan utama pada penelitian ini digunakan *sequencing batch reactor* (SBR) yang merupakan salah satu modifikasi dari sistem pengolahan limbah lumpur aktif. SBR dilengkapi dengan sistem pengaturan operasi untuk mengendalikan jalannya proses anaerobik-aerobik. Peralatan utama yang digunakan untuk memproduksi PHA berupa rangkaian SBR yang terdiri atas bioreaktor berukuran $(20 \times 20 \times 25) \text{ cm}^3$ yang terbuat dari bahan *flexiglass* (Gambar 1). Bioreaktor ini dilengkapi dengan sistem aerasi, sistem pengaduk magnet, sistem pengumpulan, dan sistem pembuangan. Peralatan utama dilengkapi dengan peralatan pendukung yang berupa tangki umpan, katup-katup, dan tangki keluaran.

Hasil yang diperoleh dari proses yang terjadi dalam peralatan utama dengan bantuan peralatan pendukung tersebut di atas kemudian dianalisa untuk dapat diambil kesimpulan penelitian yang telah dilakukan. Peralatan yang diperlukan untuk analisis sampel meliputi instrumen analisis dan peralatan gelas atau penunjang. Instrumen analisis berupa neraca, pH meter, oven, alat sentrifugasi, pengukur titik leleh, dan spektrofotometer ultraviolet. Sedangkan peralatan penunjangnya adalah pompa vakum, desikator, digester, kondensor, pemanas listrik, gelas kimia, labu erlenmeyer, buret, pipet volum, labu takar, gelas ukur, dan lain-lain.



Gambar 1. Sequencing Batch Reaktor

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dibagi menjadi dua tahap, yaitu (1) tahap pembibitan dan aklimatisasi, dan (2) tahap percobaan utama. Pengamatan pada tahap kedua dibedakan menjadi dua, yaitu pada kondisi transien dan pada kondisi stabil.

Tahap pembibitan dan aklimatisasi

Pembibitan bertujuan untuk menyediakan bibit mikroorganisme yang akan dipakai dalam pengolahan limbah. Pada percobaan ini, lumpur yang digunakan berasal dari pengolahan limbah industri tekstil. Setelah mikroorganisme berkembang dan mencapai konsentrasi tertentu, dilakukan aklimatisasi yang bertujuan untuk menjadikan mikroorganisme adaptif dengan lingkungan yang sesuai pada percobaan yang dilakukan, sehingga mikroorganisme dapat berkembang biak dengan baik.

Tahap percobaan utama

Lumpur aktif sebanyak 1,5 liter dimasukkan ke dalam reaktor. Kemudian reaktor diisi dengan limbah cair sintetis hingga mencapai volum kerja 6 liter. Satu siklus SBR membutuhkan waktu 12 jam. Kondisi-kondisi yang diusahakan tetap adalah temperatur kamar, pH netral (pada awal operasi), dan SRT selama 20 hari. Variabel tetap lainnya adalah waktu pengendapan 6 jam dan waktu dekantasi 1 jam. Rasio waktu aerob : anaerob juga ditetapkan 3 : 6 jam/jam, dimana pada penelitian yang dilakukan oleh Purnama [2001] rasio ini memberikan hasil PHA terbesar. Kondisi aerob dicapai dengan mengalirkan udara ke dalam reaktor hingga kelarutan oksigen sekitar 2 mg/L. Pada

kondisi anaerobik, sistem pengaduk magnet dijalankan untuk membantu sirkulasi dan mencegah pengendapan, sehingga reaksi masih dapat terus berlangsung.

Pada akhir waktu siklus, sampel diambil dan dianalisis untuk besaran-besaran MLSS, COD, TKN, dan kandungan PHA. Pengamatan ini dilakukan sampai diperoleh kondisi stabil, dimana konsentrasi MLSS dan COD efluen relatif tetap. Setelah kondisi stabil dicapai, dilakukan pengamatan setiap jam selama siklus operasi SBR untuk besaran-besaran pH, MLSS, COD, TKN, dan kandungan PHA. Pada kondisi ini pula dilakukan analisis BOD terhadap konsentrasi umpan dan efluen, dan analisis TVA untuk kondisi aerob dan anaerob pada setiap variasi percobaan.

Penentuan kandungan PHA dilakukan berdasarkan pengamatan titik leleh PHA dan pengukuran absorbansi pada 23 nm. Pengambilan PHA dilakukan dengan memecah dinding sel dan ekstraksi menggunakan larutan kloroform. Larutan ini dibagi dua, yaitu (1) dilarutkan dengan asam sulfat pekat untuk pengukuran absorbansi, dan (2) diendapkan dengan menambahkan larutan metanol dan membiarkannya hingga kering untuk pengukuran titik leleh.

Percobaan utama dilakukan untuk mengamati perbedaan kandungan PHA yang dihasilkan jika waktu pengamatan dan saat dimulainya tahap aerob dan tahap mixing dalam satu siklus divariasikan.

Prosedur analisa

Analisa dilakukan untuk mengetahui konsentrasi MLSS dan kandungan PHA.

Rancangan riset

Riset yang akan dilakukan merupakan riset dengan rancangan eksperimen murni. Percobaan direncanakan dengan menggunakan faktorial design dengan ulangan 2 kali. Data yang diperoleh dianalisis dengan analisis varian menggunakan normal probability plot, untuk mengetahui apakah ada pengaruh variabel bebas terhadap variabel tergantungnya. Untuk mencari kondisi optimumnya digunakan metode *Respon Surface Methodology*.

Hasil dan Pembahasan

Pembibitan dan aklimatisasi

Pembibitan bertujuan untuk menyediakan bibit mikroorganisme yang akan dipakai dalam pengolahan limbah. Pada percobaan ini, lumpur yang digunakan berasal dari pengolahan limbah industri tekstil PT. Apac Inti di Ungaran. Setelah mikroorganisme berkembang dan mencapai konsentrasi tertentu, dilakukan aklimatisasi yang bertujuan untuk menjadikan mikroorganisme adaptif dengan lingkungan yang sesuai pada percobaan yang dilakukan, sehingga mikroorganisme dapat berkembang biak dengan baik.

Pada kondisi transien, dilakukan analisa tiap hari untuk mengamati MLSS, COD, perolehan PHA, dan TKN (dua hari sekali). Analisa BOD dilakukan pada awal dan akhir percobaan tiap tempuhan dan TVA juga dilakukan tiap tempuhan.

Tahap penelitian pendahuluan

Lumpur aktif sebanyak 1,5 liter dimasukkan ke dalam reaktor. Kemudian reaktor diisi dengan limbah cair industri tapioka hingga mencapai volum kerja 6 liter. Satu siklus SBR membutuhkan waktu 12 jam. Kondisi-kondisi yang diusahakan tetap adalah temperatur kamar, pH netral (pada awal operasi), dan SRT selama 20 hari. Variabel tetap lainnya adalah waktu pengendapan 6 jam dan waktu dekantasi 1 jam. Rasio waktu aerob : anaerob juga ditetapkan 3 : 6 jam/jam, dimana pada penelitian yang dilakukan oleh Purnama [2001] rasio ini memberikan hasil PHA terbesar. Kondisi aerob dicapai dengan mengalirkan udara ke dalam reaktor hingga kelarutan oksigen sekitar 2 mg/L. Pada kondisi anaerobik, sistem pengaduk magnet dijalankan untuk membantu sirkulasi dan mencegah pengendapan, sehingga reaksi masih dapat terus berlangsung.

Pada akhir waktu siklus, sampel diambil dan dianalisis untuk besaran-besaran MLSS, COD, TKN, dan kandungan PHA. Pengamatan ini dilakukan sampai diperoleh kondisi stabil, dimana konsentrasi MLSS dan COD efluen relatif tetap. Setelah kondisi stabil dicapai, dilakukan pengamatan setiap jam selama siklus operasi SBR untuk besaran-besaran pH, MLSS, COD, TKN, dan kandungan PHA. Pada kondisi ini pula dilakukan analisis BOD terhadap konsentrasi umpan dan efluen, dan analisis TVA untuk kondisi aerob dan anaerob pada setiap variasi percobaan.

Penentuan kandungan PHA dilakukan berdasarkan pengamatan titik leleh PHA dan pengukuran absorbansi pada 23 nm. Pengambilan PHA dilakukan dengan memecah dinding sel dan ekstraksi menggunakan larutan kloroform. Larutan ini dibagi dua, yaitu (1) dilarutkan dengan asam sulfat pekat untuk pengukuran absorbansi, dan (2) diendapkan dengan menambahkan larutan metanol dan membiarkannya hingga kering untuk pengukuran titik leleh.

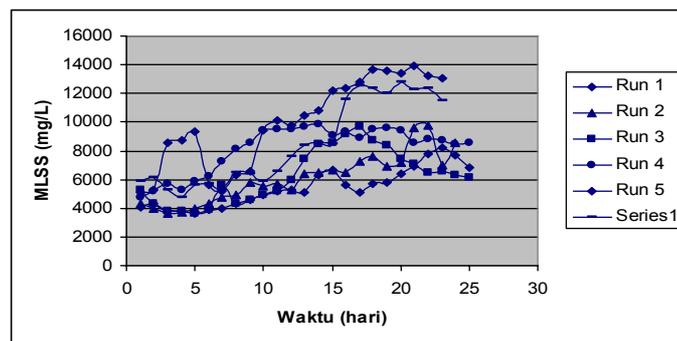
Tabel 1. Karakteristik Limbah Cair Industri Tapioka

Parameter	Rentang	Rata-rata
pH	3,6 – 5,3	4,4
COD (mg/L)	5271 – 14952	9056
BOD (mg/L)	2358 – 4681	3863
TKN (mg/L)	135,77 – 286,53	196,5

Pengamatan MLSS dan COD

Hasil pengamatan terhadap MLSS pada semua tempuhan yang dilakukan disajikan pada Gambar 2. MLSS yang diperoleh pada akhir tahapan lebih tinggi dibanding MLSS pada awal proses. Kondisi ini menunjukkan adanya perkembangan mikroorganisme yang tumbuh dalam SBR. Perbedaan yang nyata tampak pada percobaan 5 dan 6 dibandingkan dengan percobaan 1–4. Hal ini diperkirakan terjadi karena nilai rata-rata COD lebih tinggi pada percobaan 5 dan 6 daripada substrat percobaan 1–4. Nilai COD yang tinggi dapat diasosiasikan dengan tingginya kandungan senyawa organik sebagai sumber karbon untuk pertumbuhan mikroorganisme. Pada awal percobaan terjadi penurunan MLSS, hal ini disebabkan karena mikroorganisme yang sedang melakukan adaptasi terhadap kondisi SBR. Meskipun semua kondisi dalam SBR diusahakan tetap, namun kadangkala terjadi sedikit perubahan di luar kontrol yang menyebabkan timbulnya fluktuasi selama kondisi adaptasi mikroba.

Senyawa organik merupakan sumber karbon bagi mikroorganisme lumpur aktif, kondisi ini menjadi dasar bagi pengolahan limbah secara biologis. Dengan pemberian aerasi yang cukup, diharapkan mikroorganisme lumpur aktif dapat berkembangbiak menggunakan bahan organik dalam limbah sebagai sumber karbon.



Gambar 2. Grafik hubungan MLSS terhadap waktu tempuhan

Pengamatan TKN

Pengamatan terhadap penyisihan TKN dilakukan untuk mengetahui banyaknya nitrogen yang dikonsumsi oleh mikroorganisme. Nitrogen dalam bentuk amonium merupakan bahan penyusun asam amino dan asam nukleat yang berperan dalam pembentukan sel-sel baru. Hasil pengamatan terhadap penyisihan TKN untuk masing-masing tempuhan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Persentase penyisihan TKN untuk setiap tempuhan

Tempuhan	Rentang penyisihan (%)	Rata-rata (%)
1	70,00-89,39	79,87
2	30,83-87,50	73,74
3	62,26-89,57	79,19
4	55,33-90,37	73,04
5	65,30-91,09	72,74
6	44,29-82,95	63,19

Tabel 2 dapat dilihat bahwa pada semua tempuhan terjadi penyisihan TKN yang cukup besar. Hal ini menunjukkan terjadinya konsumsi nitrogen selama proses dalam SBR. Konsumsi nitrogen terutama terjadi pada saat kondisi anaerob. Pada kondisi ini tidak terjadi hambatan terhadap siklus TCA sehingga proses pembentukan sel berlangsung normal. Pembentukan sel-sel baru dapat berjalan apabila senyawa-senyawa pembentuk sel seperti oksaloasetat, piruvat, dan α -oksoglutarat berikatan dengan amonium pembentuk asam-asam amino dan asam nukleat yang merupakan monomer pembentuk sel melalui siklus glioksilat. Asam-asam amino kemudian

berpolimerisasi membentuk protein. Polimerisasi juga akan membentuk polisakarida, lipida, dan pada akhirnya membentuk sel baru. Selama proses pembentukan sel ini berjalan lancar maka amonium yang digunakan dalam proses jumlahnya semakin banyak, sehingga penyisihan nitrogen yang terukur akan semakin besar.

Pengamatan polihidroksialkanoat (PHA)

Pada percobaan ini digunakan asumsi bahwa PHA yang terbentuk merupakan kopolimer dari P(HB-ko-HV). Hal ini didasarkan pada penelitian Chua dan Yuridiksi [1999], yang menyatakan bahwa kopolimer tersebut diakumulasi oleh bakteri lumpur aktif. Pernyataan ini juga didukung dengan hasil pengamatan bahwa terhadap titik leleh PHA yang diperoleh. Titik leleh PHB standar adalah 177 °C, sedangkan titik leleh standar PHV adalah 100 °C [Wong dkk., 2000]. Hasil pengamatan terhadap titik leleh PHA yang diperoleh pada percobaan ini menunjukkan temperatur di antara titik leleh standar PHB dan PHV, maka dapat dinyatakan bahwa polimer yang terbentuk merupakan gabungan keduanya atau berbentuk kopolimer. Jadi apabila titik leleh PHA yang diamati semakin rendah, maka dapat dinyatakan bahwa kandungan HV semakin besar, dengan kata lain kandungan HB semakin kecil. Hasil pengamatan titik leleh PHA untuk tempuhan 1-6 disajikan pada Tabel 3.

Pada setiap tempuhan, PHA mempunyai rentang titik leleh tertentu. Perbedaan rentang titik leleh ini menunjukkan perbedaan kandungan HB dan HA. Pada tempuhan 1 titik leleh PHA berkisar antara 139 – 148 °C dengan nilai rata-rata 143,58 °C. Nilai rata-rata titik leleh pada tempuhan 1 ini lebih tinggi dibanding tempuhan-tempuhan yang lain. Walaupun perbedaan titik leleh PHA-nya tidak begitu signifikan, terutama jika dibandingkan dengan tempuhan 2, namun kondisi ini menunjukkan bahwa kandungan HB pada tempuhan 1 lebih banyak daripada tempuhan yang lain.

Pengamatan terhadap kandungan PHA rata-rata untuk semua tempuhan tidak memberikan perbedaan yang besar, namun dapat dilihat bahwa perolehan terendah diperoleh pada tempuhan 1 yaitu tempuhan dengan periode aerob yang terpanjang (5 jam). PHA terutama dibentuk pada periode anaerob yaitu saat terjadi hambatan terhadap siklus TCA, sehingga semakin panjang periode aerob maka PHA yang dihasilkan semakin rendah.

Tabel 3. Titik leleh PHA untuk setiap tempuhan

Run	Waktu Pengisian	Rentang Titik Leleh (°C)	Titik-Leleh Rata-rata (°C)	% HV rata-rata	Kandungan PHA rata-rata (g/gsel)
1	6 jam	139 – 148	143,58	11,28	0,0809
2	6 jam	135 – 145	140,84	13,26	0,0813
3	6 jam	120 – 142	132,92	19,01	0,1353
4	6 jam	120 – 134	126,00	24,02	0,1453
5	6 jam	122 – 150	133,52	18,57	0,1328
6	2 jam	120 – 134	126,26	23,83	0,1838

Optimasi Proses

Proses optimasi diawali dengan melakukan percobaan dengan rancangan faktorial desain guna menentukan variabel yang paling berpengaruh. Desain percobaan berdasarkan faktorial desain dibuat dengan menentukan batas atas dan batas bawah (*high and low level*) dari masing-masing variabel. Variabel yang dipelajari dalam penentuan variabel yang paling berpengaruh adalah rasio C:N (A), konsentrasi fosfor (B), konsentrasi oksigen (C), rasio aerob-anaerob (D) dan konsentrasi nitrogen (E). Data level atas dan bawah dari masing-masing variabel tersaji pada Tabel 4.

Tabel 4. Data level atas dan bawah

Variabel	Level bawah	Level atas
Rasio C:N	10:1	20:1
Konsentrasi fosfor	2 mg/L	10 mg/L
Konsentrasi oksigen	2 mg/L	5 mg/L
Rasio aerob:anaerob	1:1	1:4
Konsentrasi nitrogen	2 mg/L	10 mg/L

Untuk masing-masing tempuhan percobaan, sampel diambil dan dianalisa kandungan PHA-nya. Respon dari masing-masing percobaan digunakan untuk menghitung efek utama dan efek interaksinya. Respon dari data percobaan ini adalah berat PHA yang diperoleh. Data percobaan dengan rancangan faktorial desain disajikan pada Tabel 5. Data efek utama dan efek interaksi hasil percobaan disajikan pada Tabel 6. Nilai dari harga efek mengindikasikan bahwa variabel yang paling berpengaruh adalah konsentrasi nitrogen (E).

Untuk masing-masing tempuhan percobaan, sampel diambil dan dianalisa kandungan PHA-nya. Respon dari masing-masing percobaan digunakan untuk menghitung efek utama dan efek interaksinya. Respon dari data

percobaan ini adalah berat PHA yang diperoleh. Data percobaan dengan rancangan faktorial desain disajikan pada Tabel 5. Data efek utama dan efek interaksi hasil percobaan disajikan pada Tabel 6. Nilai dari harga efek mengindikasikan bahwa variabel yang paling berpengaruh adalah konsentrasi nitrogen (E).

Tabel 5. Data percobaan faktorial desain

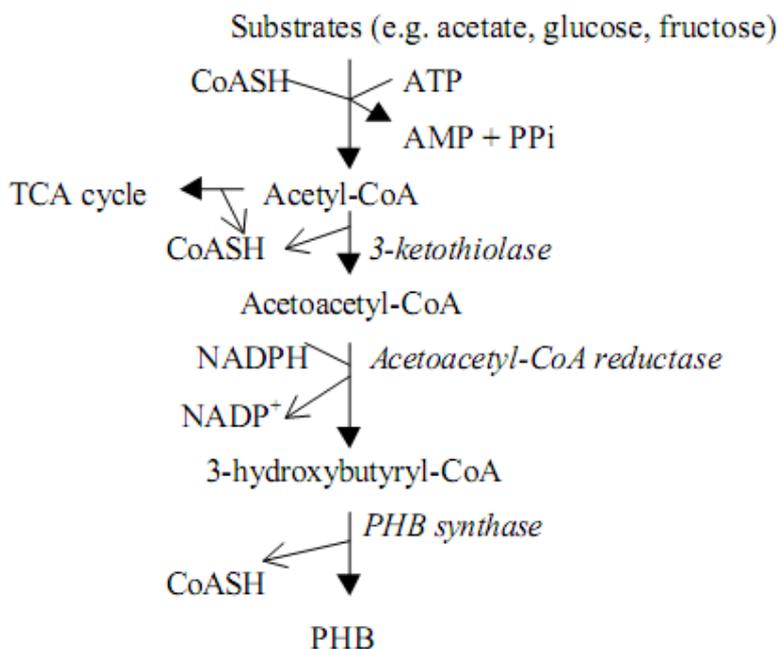
Run	Variabel					Respon r
	A	B	C	D	E	
1	-1	-1	-1	-1	-1	0,4
2	1	-1	-1	-1	-1	0,8
3	-1	1	-1	-1	-1	1,1
4	1	1	-1	-1	-1	0,6
5	-1	-1	1	-1	-1	0,6
6	1	-1	1	-1	-1	1,0
7	-1	1	1	-1	-1	0,8
8	1	1	1	-1	-1	0,6
9	-1	-1	-1	1	-1	1,3
10	1	-1	-1	1	-1	0,35
11	-1	1	-1	1	-1	0,44
12	1	1	-1	1	-1	0,32
13	-1	-1	1	1	-1	0,17
14	1	-1	1	1	-1	0,35
15	-1	1	1	1	-1	0,44
16	1	1	1	1	-1	1,2
17	-1	-1	-1	-1	1	0,57
18	1	-1	-1	-1	1	0,44
19	-1	1	-1	-1	1	1,2
20	1	1	-1	-1	1	0,57
21	-1	-1	1	-1	1	0,44
22	1	-1	1	-1	1	0,56
23	-1	1	1	-1	1	0,68
24	1	1	1	-1	1	0,53
25	-1	-1	-1	1	1	0,44
26	1	-1	-1	1	1	0,33
27	-1	1	-1	1	1	0,76
28	1	1	-1	1	1	1,1
29	-1	-1	1	1	1	0,55
30	1	-1	1	1	1	0,45
31	-1	1	1	1	1	1,0
32	1	1	1	1	1	0,74

Biasanya, glikogen dan material yang mirip dengan glikogen (*glycogen-like materials*) terakumulasi didalam sel ketika nitrogen berada dalam kondisi terbatas serta ketika karbon berada dalam keadaan berlebih didalam medium (Punrattanasin, 2001). Punrattanasin (2001), menyatakan bahwa selain pada kondisi sedikit nitrogen, glikogen juga dapat terakumulasi pada kondisi dengan kadar fosfor dan sulfur yang terbatas pula atau pada kondisi dengan pH yang tidak disukai. Namun demikian kondisi dengan kadar nitrogen yang terbatas dilaporkan merupakan kondisi yang menstimulasi akumulasi glikogen di berbagai organisme.

Punrattanasin (2001) menyatakan bahwa akumulasi PHA dapat distimulasi pada kondisi pertumbuhan yang tidak seimbang, misalnya ketika nutrisi seperti nitrogen, fosfor atau sulfat terbatas, ketika konsentrasi oksigen rendah, atau ketika rasio C:N dari umpan tinggi. Kondisi dengan kadar nutrisi yang terbatas akan mengakibatkan akumulasi PHA pada berbagai mikroorganisme. Sebagai tambahan, selain kondisi terbatasnya kadar nitrogen, fosfor, oksigen, dan sulfat, terbatasnya beberapa senyawa seperti besi, magnesium, mangan, potasium dan natrium juga menstimulasi akumulasi PHA. Ketika kondisi pertumbuhan berada pada keadaan tidak seimbang, acetyl-CoA tidak dapat masuk kedalam siklus TCA (*tricarboxylic acid*) guna mendapatkan energi untuk sel-sel akibat dari tingginya konsentrasi *cycle* NADH. Tingginya konsentrasi NADH dihasilkan dari proses sintesis protein, yaitu proses yang berjalan beriringan dengan proses generasi ATP yang dilakukan oleh rantai transport elektron dalam keadaan keterbatasan nutrisi.

Tabel 6. Harga efek utama dan efek interaksi

Efek	Harga Efek	Efek	Harga Efek
A	-0,1	ABD	0,179375
B	0,030625	ABE	0,003125
C	-0,0275	ACD	0,104375
D	-0,06	ACE	-0,138125
E	-0,656875	ADE	0,011875
AB	-0,005625	BCD	0,166875
AC	0,144375	BCE	-0,084375
AD	-0,014375	BDE	0,001875
AE	0,001875	CDE	0,019375
BC	0,081875	ABCD	-0,034375
BD	0,049	ABDE	-0,181875
BE	-0,033125	ABCE	-0,003125
CD	-0,021875	ACDE	-0,106875
CE	0,009375	BCDE	-0,169375
DE	0,083125	ABCDE	0,031875
ABC	0,000625		



Gambar 3. Lintasan metabolisme pembentukan PHB

Tingginya konsentrasi NADH akan mengganggu proses sintesa enzim sitrat, yang merupakan salah satu enzim yang berperan penting dalam siklus TCA. Hal tersebut akan mengakibatkan meningkatnya kadar acetyl-CoA. Selanjutnya acetyl-CoA akan digunakan sebagai substrat untuk biosintesis PHA melalui tiga reaksi enzimatik berantai. Sebagai tambahan, tingginya konsentrasi intraseluler CoA akan menghambat enzim 3- ketothiolase, salah satu dari tiga enzim yang berperan dalam sintesis PHA. Ketika masuknya acetyl-CoA kedalam siklus TCA tidak dibatasi, maka CoA bebas akan dikeluarkan sebagai gugus acetyl dari aktivitas citrate synthase, seperti halnya ketika acetyl-CoA digunakan maka konsentrasi CoA intraseluler meningkat dan sintesa PHA terhambat. PHA dapat digunakan sebagai cadangan karbon atau sumber energi dari mikroorganisme pada periode dimana kadar karbon minimal.

Simpulan dan Saran

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi relatif baik diperoleh pada perendaman 2 jam dengan rekoveri PHA sebesar 61,5%. Sedangkan variabel proses yang paling berpengaruh adalah konsentrasi nitrogen. Kondisi optimum untuk rekoveri PHA dicapai pada konsentrasi nitrogen sebesar 4 mg/L, konsentrasi fosfor 2 mg/L, konsentrasi oksigen 5 mg/L dan rasio aerob-anaerob pada 1:4.

Ucapan Terima Kasih

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan syukur Alhamdulillah kepada Allah SWT serta terima kasih yang sebesar-besarnya kepada DP2M DIKTI atas dukungan dana dalam kegiatan Penelitian Hibah Bersaing 2012.

Daftar Pustaka

- Achmad, L.F., Handayani, D., dan Arifan, F., (2008), "Model Regresi Biokonversi Limbah Cair Industri Pangan Menjadi Plastik *Biodegradable* (*Polihidroksialkanoat*) Dengan Menggunakan Lumpur Aktif", Laporan Fundamental DIKTI.
- American Public Health Association, (1992), "Standard Method for the Examination of Water and Wastewater", 18th ed., APHA, Washington USA.
- Annuar, M.S., Irene K.P.Tan and K.B. Ramachandran, "Evaluation Of Nitrogen Sources For Growth And Production Of Medium-Chain-Length Poly-(3-Hydroxyalkanoates) From Palm Kernel Oil By *Pseudomonas Putida* PGA1", Asia Pacific Journal of Molecular Biology and Biotechnology, Vol. 16 (1) : 11-15
- Arifan, F., Yulianto, M.E., dan Paramita, V.,(2005),"Pemanfaatan Limbah Cair Industri Pangan Berbahan Baku Tepung Terigu Sebagai Plastik *Biodegradable*", Laporan Penelitian P&K Jateng.
- Budihardjo, M.A., Handayani, D., dan Arifan, F., (2009)," Pengembangan *Sequencing Batch Bioreactor* Untuk Produksi Plastik *Biodegradable* (*Polihidroksialkanoat*) dari Limbah Cair Industri Tapioka", Laporan Hibah Bersaing DP2M.
- Chua, H., dan P.H.F. Yu, (1999), "Production of Biodegradable Plastics from Chemical Wastewater – A Novel Method to Reduce Excess Activated Sludge Generated from Industrial Wastewater Treatment", *Wat. Sci. Tech.*, 39(10-11), hal. 273-280.
- Chua, H., P.H.F. Yu, dan L.Y. Ho, (1997), "Coupling of Wastewater Treatment with Storage Polymer Production", *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 63, hal. 627-635.
- Droste, R.L., (1997), "Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment", John Wiley & Sons, New York, hal. 547-612.
- Handayani, D., (2007),"Pemanfaatan Limbah Cair Industri Pangan Berbahan Baku Tepung Terigu Sebagai Plastik *Biodegradable*", Laporan PKM DIKTI.
- Helmreich, B., D. Schreff, dan P.A. Wilderer, (2000), "Full Scale Experiences with Small Sequencing Batch Reactor Plants in Bavaria", *Wat. Sci. Tech.*, 41(1), hal. 89-96.
- Henze, Mogens, Poul Harremoes, Jes la Cour Jansen, dan Erik Arvin, (1995), "Wastewater Treatment: Biological and Chemical Process", Springer-Verlag Berlin, Germany, hal. 95-98, 273-283.
- Horan, N.J., (1991), "Biological Wastewater Treatment Systems: Theory and Operation", John Wiley & Sons, England, hal. 197, 230-233.
- Jogdand, S.N., (2000), "Welcome to the World of Eco-Friendly Plastics : Bioplastics", *C:\ProgramFiles\TeleportPro\Projects\Bioplastic_India\BP6.htm*
- Lee, S.Y., (1996), Plastic Bacteria? "Progress and Prospects for Polyhydroxyalkanoate Production in Bacteria", *Tibtech*, 14, hal. 431-438.

- Mino, T., M.C.M. Van Loosdrecht, dan J.J. Heijnen, (1998), "Microbiology and Biochemistry of the Enhanced Biological Phosphate Removal Process", *Wat. Res.*, 32(11), hal. 3193-3207.
- Poirier, Y., C. Nawrath, dan C. Someville, (1995), "Production of Polyhydroxyalkanoates, a Family of Biodegradable Plastics and Elastomers, in Bacteria and Plants", *Bio/Technology*, 13, hal. 142-150.
- Punrattanasin, W, (2001), "The Utilization of Activated Sludge Polyhydroxyalkanoates For the Production of Biodegradable Plastics, Environmental and Science Engineering", Virginia University.
- Purnama, H., (2001), "Kajian Awal Pembentukan Polihidroksialkanoat (PHA) pada Sistem Pengolah Limbah Lumpur Aktif dengan Sequencing Batch Reactor (SBR) ", *Tesis Magister*, Program Studi Teknik Kimia, Institut Teknologi Bandung.
- Sangkharak, K and Prasertsant, P, (2008), "Nutrien Optimization For Production Of Polyhydroxybutyrate From Halotolerant Photosynthetic Bacteria Cultivated Under Aerobic-Dark Condition", *Electronic Journal of Biotechnology* ISSN: 0717-3458, Vol.11 No.3.
- Satoh, H., T. Mino, dan T. Matsuo, (1999), "PHA Production by Activated Sludge", *Intl. Journal. of Biological Macromolecules*, 25, hal. 105-109.
- Satoh, H., Y. Iwamoto, T. Mino, dan T. Matsuo, (1998), "Activated Sludge as a Possible Source of Biodegradable Plastic", *Wat. Sci. Tech.*, 38(2), hal. 103-109.
- Slejska, A., 1997, "Biodegradable Plastics".
- Water Environment Federation, (1994), "Basic Activated Sludge Process Control, Alexandria USA", hal. 3-12.
- Waluyohadi, (2004), "Studi Pengolahan Limbah Plastik menjadi Material Baru", Abstrak Skripsi, ITB.
- Yu, P., H. Chua, A.L. Huang, W. Lo, dan C.Q. Chen, (1998), "Conversion of Food Industrial Waste into Bioplastics", *Appl. Biochem. Biotech.*, 70, hal. 603-614.