

PRODUKSI BIOBUTANOL SEBAGAI BAHAN BAKAR TERBARUKAN MELALUI PROSES FERMENTASI

(Biobutanol Production As A Renewable Fuel By Fermentation Process)

Yanni Kussuryani dan Devitra Saka Rani.

Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi "LEMIGAS"

Jl. Ciledug Raya Kav.109, Cipulir, Kebayoran Lama, Jakarta Selatan

Telepon: +62-21-7394422, Fax.: +62-21-7246150

email: yan_kus@lemigas.esdm.go.id - devitra@lemigas.esdm.go.id

Teregistrasi I tanggal 1 April 2015; Diterima tanggal 22 April 2015; Disetujui terbit tanggal: 29 Mei 2015

ABSTRAK

Butanol merupakan salah satu energi alternatif sebagai bahan bakar campuran/pengganti bensin. Kandungan energi dari butanol mendekati bensin premium sehingga konsumsi bahan bakar serupa dengan bensin murni. Beberapa keuntungan butanol sebagai campuran bensin antara lain: tidak korosif, kurang menyerap air, dan memiliki tekanan uap yang rendah. Butanol dapat ditambahkan di kilang dan diangkut/dikirimkan melalui infrastruktur yang sudah ada. Butanol yang dihasilkan dari proses fermentasi biomassa biasa disebut biobutanol. Sumber biomassa selulosa di Indonesia sangat berlimpah. Limbah pertanian, limbah pengolahan kayu, dan serat tanaman, merupakan contoh biomassa yang belum dimanfaatkan secara maksimal. Tujuan penelitian ini adalah untuk menghasilkan biobutanol dengan bahan baku biomassa melalui proses fermentasi serta rancang bangun suatu prototipe reaktor biobutanol terpadu berbahan baku selulosa skala mini pilot untuk produksi biobutanol kualitas bahan bakar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kandungan biobutanol dari fermentasi menggunakan *C. beijerinckii* dengan bahan baku mikroalga memberikan hasil yang paling tinggi yaitu sebesar 40,24%, diikuti ampas tebu sebesar 23,27%, dan jerami padi sebesar 7,94%. Sedangkan dari biomassa lainnya, biobutanol yang dihasilkan masih relatif kecil, sehingga perlu upaya-upaya optimasi. Instalasi mini pilot biobutanol terpadu telah mampu menghasilkan biobutanol, namun masih diperlukan perbaikan pada sistem vakum, motor pompa peristaltik, dan penyempurnaan sistem pelucutan gas. Dengan demikian, di masa mendatang reaktor biobutanol terpadu ini dapat digunakan sebagai dasar pengembangan bahan bakar nabati skala industri.

Kata Kunci : Biobutanol, fermentasi butanol, biomassa/limbah agrikultur, bahan bakar terbarukan.

ABSTRACT

Butanol is one of the alternative energy as a mixture or replacement for petroleum gasoline. Butanol energy content is close to gasoline so that the fuel consumption is similar to pure gasoline. Some of the advantages of butanol as gasoline mixture are its non-corrosive, resists water absorption, and low vapor pressure. Butanol can be added at the refinery and transported through the existing pipelines. Butanol produced from fermentation process of biomass called biobutanol. Cellulosic biomass as butanol feedstock is very abundant especially in Indonesia. Agricultural waste, waste wood processing, fiber crops, are examples of biomass which untapped optimally. The purpose of this research are biobutanol production using biomass feedstocks by fermentation process as well as installation of a prototype of integrated biobutanol reactor on mini pilot scale using cellulosic

biomass feedstock for fuel grade biobutanol production. The result showed that the highest butanol content by fermentation using *C. beijerinckii* yielded from microalgae biomass (40.24%), followed by bagasse (23.27%) and rice straw (7.94%) whereas biobutanol from other biomass are low and need optimization process. The integrated mini pilot biobutanol was able to produce biobutanol and needed improvement in vacuum systems, peristaltic pump motor, and the gas stripping system. Thus, in the future, the integrated biobutanol reactor can be used as basic technology for the development of industrial-scale biofuels.

Keywords : biobutanol, butanol fermentation, lignocellulosic biomass, renewable energy.

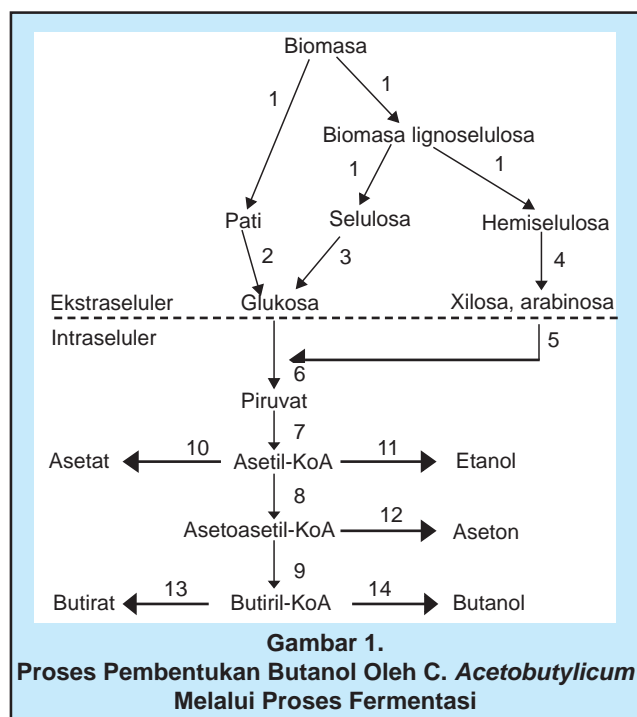
I. PENDAHULUAN

Pemerintah mencanangkan program pengalihan energi dari energi berbasis bahan bakar fosil ke energi baru dan terbarukan, dan sesuai target dalam Kebijakan Energi Nasional (KEN) bahwa pada tahun 2025 peran Energi Baru dan Energi Terbarukan paling sedikit 23%, serta pada tahun 2050 paling sedikit 31%. Program pemanfaatan Bahan Bakar Nabati (BBN) telah berjalan, namun realisasinya belum sesuai dengan yang diharapkan. Sebagai contoh, saat ini ketersediaan fuel grade ethanol, dengan total kapasitas sebesar 117 ribu kL, sedangkan target mandatori tahun 2014 sebesar 155 ribu kL. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, maka produksi bioetanol perlu ditingkatkan atau dilakukan pengembangan BBN lain seperti biobutanol.

Butanol merupakan alkohol yang memiliki empat gugus karbon. Butanol atau butil alkohol merupakan alkohol primer yang mempunyai rumus molekul C_4H_9OH dan Berat Molekul 74,12. Butanol merupakan cairan tak berwarna dengan bau yang khas, dapat digunakan sebagai pelarut dan bahan bakar. Beberapa keuntungan butanol bila digunakan sebagai bahan bakar antara lain tidak korosif, kurang menyerap air/kurang higroskopis, dan memiliki tekanan uap yang lebih rendah sehingga tidak ada pemisahan fasa dari campuran BBN-bensin yang akan terjadi. Ini berarti bahwa butanol dapat ditambahkan di kilang (pada konsentrasi apapun), dan diangkut/dikirimkan melalui infrastruktur yang sudah ada seperti jaringan pipa, tangki penyimpanan, maupun stasiun pengisian (Aleksic, 2009). Kandungan energi dari butanol mendekati sifat bensin premium sehingga konsumsi bahan bakar serupa dengan bensin murni. Dalam hal aplikasi di kendaraan, penggunaan butanol tidak memerlukan modifikasi untuk mesin mobil (Dürre, 2008). Hasil penelitian Deng et al. (2013) menunjukkan bahwa biobutanol memberikan retensi ketukan (knocking) yang lebih tinggi yang berakibat pembakaran lebih efisien. Sedangkan penelitian Merola et al. (2012) menunjukkan bahwa campuran butanol dalam

bensin hingga 40% menyebabkan waktu penyalaan lebih maju, tanpa menimbulkan efek negatif pada kinerja mesin. Penelitian yang dilakukan LEMIGAS pada mesin sepeda motor menunjukkan bahwa waktu akselerasi rata-rata bahan bakar bensin yang mengandung 10% butanol adalah 3,44% lebih baik dibandingkan tanpa butanol (Semar & Yuliarita, 2011).

Proses produksi butanol dapat dilakukan secara kimiawid dan hayati. Proses kimia menggunakan etanol sebagai bahan baku melalui kondensasi aldol dengan katalis oksida logam. Proses produksi butanol secara kimia biasanya relatif lebih cepat dan rendemennya lebih tinggi dibandingkan proses fermentasi biomassa (Ndaba, 2015). Namun demikian etanol sebagai bahan baku pada proses produksi secara kimiawi ketersediaannya terbatas. Sedangkan butanol yang diproduksi secara hayati yaitu melalui proses fermentasi Aseton-Butanol-Etanol (ABE) menggunakan bakteri *Clostridium* sp. menggunakan bahan baku berbagai jenis biomassa. Sumber biomassa selulosa di Indonesia sangat



berlimpah. Limbah pertanian, limbah pengolahan kayu, dan serat tanaman, merupakan contoh biomassa yang belum dimanfaatkan secara maksimal. Butanol yang dihasilkan dari proses fermentasi biomassa ini dikenal dengan sebutan biobutanol. Diagram proses produksi biobutanol dengan bahan baku biomassa melalui fermentasi oleh *C. acetobutylicum* ditunjukkan pada Gambar 1 (Ezeji et al., 2007).

Saat ini pengembangan BBN di Indonesia sebagai substitusi bensin masih berfokus pada bioetanol. Sementara di negara maju tengah fokus pada pengembangan dan aplikasi biobutanol sebagai bahan bakar nabati yang lebih menjanjikan dibandingkan bioetanol. Penelitian produksi biobutanol telah dilakukan oleh Kumar & Gayen, 2011 dengan bahan baku selulosa seperti jerami gandum, jerami barley, tongkol jagung, rumput prairie, dan limbah organik rumah tangga. Maksimum konsentrasi total ABE pada umumnya sebesar 20 g/L ketika menggunakan *C. acetobutylicum* atau *C. beijerinckii* (Ezeji et al., 2005). Di Indonesia penelitian maupun pengembangan biobutanol sebagai energi alternatif belum dilakukan pada skala yang lebih besar. Penelitian yang telah dilakukan di Indonesia antara lain pemanfaatan ampas tebu dan kulit kentang untuk fermentasi biobutanol sebagai bahan bakar pembangkit listrik (Yalun et al., 2014), namun fermentasi biomassa yang digunakan masih sangat kecil yaitu kurang dari 10-20 g bahan kering. Penelitian biobutanol lainnya yaitu pemanfaatan serbuk gergaji menjadi biobutanol dengan hidrolisis selulase (Fajariah & Hadi, 2014), juga pada skala tabung dengan 50 g bahan kering. Yang diperlukan saat ini adalah biobutanol kualitas bahan bakar dalam jumlah yang lebih besar yang bisa diaplikasikan baik langsung maupun sebagai campuran bensin pada kendaraan bermotor. Untuk dapat menjawab semua tantangan tersebut di atas, maka diperlukan penelitian yang kontinu dan komprehensif mengenai produksi biobutanol menggunakan teknologi fermentasi sebagai sumber energi alternatif. Teknologi produksi biobutanol yang dihasilkan haruslah yang ekonomis dan efisien dengan memanfaatkan sumber daya yang ada di Indonesia termasuk bahan baku dan biakan mikroba.

Penelitian ini ditujukan untuk menghasilkan biobutanol dengan bahan baku biomassa antara lain limbah pertanian melalui proses fermentasi dengan memanfaatkan aktivitas mikroba. Selain itu, penelitian ini akan menghasilkan suatu prototipe reaktor biobutanol terpadu berbahan baku biomassa

selulosa skala mini pilot untuk produksi biobutanol kualitas bahan bakar. Biobutanol yang dihasilkan dapat menambah ketersediaan bahan bakar sekaligus menanggulangi permasalahan limbah/lingkungan.

II. METODOLOGI

Produksi biobutanol dalam penelitian ini dilakukan dalam skala tabung (1-2 liter) dan skala mini pilot (20 liter) yang dirancang mengacu berbagai literatur dan kondisi operasi proses produksi biobutanol skala tabung.

Proses Produksi Biobutanol

Tahapan produksi biobutanol meliputi: persiapan bahan baku biomassa dan hidrolisis, aktivasi dan kultivasi biakan bakteri, serta proses fermentasi.

- **Persiapan Bahan Baku Biomassa dan Hidrolisis**
Pemilihan bahan baku biomassa dan proses hidrolisis secara umum mengacu pada penelitian terdahulu (Rani & Sari, 2012). Biomassa yang digunakan pada penelitian ini adalah ampas tebu, jerami padi, mikroalga, limbah pulp, tongkol jagung, dan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS). Proses hidrolisis terdiri dari dua bagian yaitu hidrolisis dengan asam encer atau Dilute Acid Pretreatment (DAP) dan hidrolisis dengan menggunakan enzim. Asam encer yang digunakan adalah asam sulfat (H_2SO_4) 1 % serta pemanasan dalam autoklaf pada suhu $130^\circ C$ selama 30 menit. Setelah hidrolisis asam, pH larutan dinaikkan hingga pH 4,8 dengan menggunakan larutan NaOH 10 M. Selanjutnya dilakukan hidrolisis enzimatis dalam larutan bufer sitrat menggunakan campuran enzim Celluclast® 1.5 L, Novozyme 188, dan Viscozyme® L dari Sigma Aldrich. Proses ini berlangsung pada suhu $50^\circ C$, pH 4,8, putaran 120 rpm, selama 72 jam. Setelah proses selesai, erlenmeyer yang berisi biomassa dan enzim disterilkan untuk menghentikan kerja enzim. Hidrolisat ini kemudian digunakan sebagai bahan baku fermentasi biobutanol.
- **Aktivasi dan Kultivasi Bakteri**
Biakan bakteri yang digunakan adalah *C. acetobutylicum* ATCC 824 yang didapat dari Pusat Studi Bioteknologi, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta dan *C. beijerinckii* NBRC 103909 yang didapat dari Jepang. Pemeliharaan biakan bakteri meliputi aktivasi bakteri dengan perlakuan kejutan panas (heat shocked) $80^\circ C$ selama 10 menit (Servinsky et al., 2010), diikuti dengan kultivasi biakan hasil kejutan panas dalam media Reinforced Clostridial Medium (RCM) dari

Merck®. Biakan diadaptasikan pada media RCM sebanyak duakali, masing-masing diinkubasi selama 24 jam pada suhu 35-37°C. Bila akan digunakan sebagai biakan fermentasi, biakan dari media RCM ditanam dalam media Tryptone Glucose Yeast (TGY) dan diinkubasi selama 6 jam. Biakan 6 jam ini yang akan digunakan sebagai biakan fermentasi biobutanol. Semua pemindahan dan penanaman bakteri dilakukan secara anaerob dalam Anaerobic Chamber (COY Technology).

- Proses Fermentasi

Proses fermentasi biobutanol dilakukan dengan sistem lompok (*batch*) dengan penambahan 10% biakan *C. acetobutylicum* atau *C. beijerinckii* dalam media TGY umur 6 jam yang ditambahkan nutrisi P2 yaitu buffer, mineral, vitamin, dan ekstrak ragi (Qureshiet al. 2008). Fermentasi berlangsung selama 72 - 96 jam pada suhu 35-37°C secara anaerob. Proses separasi produk dari kaldu fermentasi digunakan sistem distilasi pada suhu 92-93°C (suhu azeotrop butanol-air).

B. Uji Coba Mini Pilot Biobutanol Terpadu

Peralatan mini pilot biobutanol terpadu dirancang untuk memproduksi biobutanol secara kontinu dengan sistem pemisahan pelucutan gas/gas stripping (Ezeji et al., 2005). Melalui sistem pemisahan ini diharapkan diperoleh fuel grade biobutanol. Uji coba alat telah dilakukan dengan fermentasi larutan glukosa standar 6%. Gambar mini

pilot biobutanol terpadu disajikan pada Gambar 2.

Keterangan:

1. Autoklaf
2. Panel Pemanas Hidrolisis /Sakarifikasi
3. Tangki Hidrolisis/Sakarifikasi
4. Gas Stripping
5. Penampung Produk
6. Input bakteri
7. Tangki Fermentasi
8. Kolom distilasi
9. Panel Kontrol
10. Pompa Peristaltik
11. Tabung N₂
12. Pendingin
13. Circulating Temperature Bath

Peralatan mini pilot biobutanol terpadu dirancang dengan kapasitas autoklaf untuk hidrolisis asam sampai dengan 100 kg dan kapasitas fermentasi 20 liter. Proses hidrolisis enzim sampai dengan proses pelucutan gas pada alat ini dibuat secara otomatis dan kontinu.

C. Analisis

Analisis yang dilakukan meliputi penghitungan populasi bakteri dengan metode Angka Lempeng Total (ALT), analisis kandungan gula reduksi dengan metode Nelson-Somogyi, serta analisis produk yang dihasilkan yaitu aseton, biobutanol dan bioetanol



Gambar 2.
Peralatan Mini Pilot Biobutanol Terpadu

menggunakan kromatografi gas dengan flame ionization detector (FID).

III. HASIL DAN DISKUSI

Aktivasi dan Kultivasi Bakteri Penghasil Biobutanol

Aktivasi dan kultivasi bakteri penghasil biobutanol telah dilakukan dengan beberapa variasi media pertumbuhan dan perlakuan kejutan panas, dan diperoleh media RCM yang optimal untuk pertumbuhan bakteri dan media TGY untuk proses fermentasi. Pertumbuhan *C. beijerinckii* dan *C. acetobutylicum* dalam media RCM secara visual tidak terlihat perbedaan pertumbuhan antara keduanya (Gambar 3). Namun, ternyata hasil perhitungan populasi bakteri menunjukkan bahwa populasi *C. beijerinckii* lebih tinggi dibandingkan *C. acetobutylicum* (Tabel 1). Hal ini menunjukkan bahwa perkembangbiakan *C. beijerinckii* lebih baik daripada *C. acetobutylicum*, dan pada fermentasi berikutnya populasinya pun makin meningkat. Dengan demikian penggunaan biakan *C. beijerinckii* akan menghasilkan produk biobutanol yang lebih tinggi.

Hasil uji fermentasi glukosa 6% dengan *C. acetobutylicum* menunjukkan konsentrasi butanol yang lebih rendah dibandingkan fermentasi glukosa 6% menggunakan *C. beijerinckii* NBRC 103909. Hal ini terlihat dari kecilnya respons detektor dalam piko ampere pada kromatogram (Gambar 4). Dengan demikian penggunaan biakan bakteri *C. beijerinckii* NBRC 103909 mampu meningkatkan perolehan biobutanol yang lebih baik.

Dari Gambar 4 terlihat bahwa konsentrasi produk yang diperoleh menggunakan *C. beijerinckii* belum optimal. Hal ini dapat disebabkan karena biakan yang digunakan masih berupa galur murni dan belum dilakukan rekayasa genetika maupun metabolic engineering. Ini diperkuat dengan hasil analisis



gula reduksi glukosa standar dengan biakan *C. beijerinckii* sebelum fermentasi yaitu 6%, sedangkan sesudah fermentasi 4,78%, yang berarti masih banyak glukosa yang belum terfermentasi.

B. Hasil Fermentasi Biobutanol

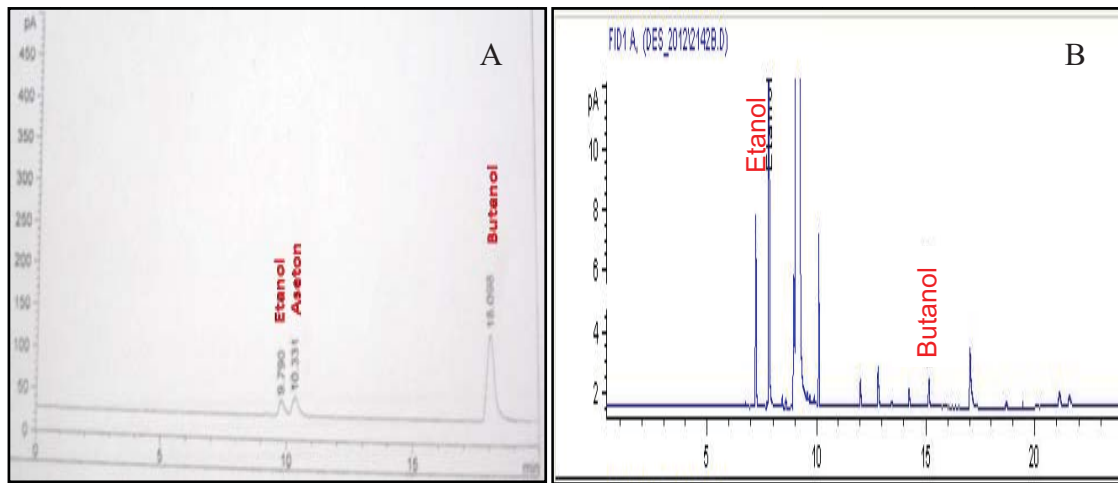
Hasil proses fermentasi dengan berbagai bahan baku biomassa menggunakan bakteri *C. beijerinckii* menunjukkan bahwa kandungan biobutanol tertinggi diperoleh dari bahan baku biomassa mikroalga (40,24%) diikuti ampas tebu (23,27%), dan jerami padi (7,94%) (Tabel 2).

Biobutanol dari jerami padi lebih kecil bila dibandingkan dengan mikroalga dan ampas tebu disebabkan proses fermentasi yang belum sempurna. Hal ini ditandai dengan masih tingginya asam butirat yang belum terkonversi menjadi biobutanol. Ezeji et al. (2007), menyatakan bahwa metabolisme biomassa dari *Clostridia solventogenik* dimulai dari pengolahan awal lignoselulosa, hidrolisis pati,

Tabel 1.
Populasi Bakteri pada Media TGY 6 jam

Bakteri	Populasi bakteri (sel/mL)	
	Lompok I	Lompok II
<i>C. acetobutylicum</i>	9×10^4	TD
<i>C. beijerinckii</i>	44×10^4	21×10^5

TD: Tidak dilakukan perhitungan



Keterangan : sumbu X=waktu retensi (menit), sumbuY= respons detektor dalam piko Ampere (pA)

Gambar 4.
Perbandingan Kromatogram Hasil Fermentasi Glukosa 6% menggunakan
C. beijerinckii (A) dan C. acetobutylicum (B)

hidrolisis selulosa sampai tahap akhir yaitu butiril Ko-A dengan adanya butiraldehid dehidrogenase dan dehidrogenase butanol akan menjadi biobutanol, namun bila fermentasinya tidak sempurna, maka butiril Ko-A dengan adanya fosfat butiltransferase dan butirat kinase akan menjadi asam butirat.

Kromatogram hasil fermentasi dari tiga biomassa yang menghasilkan biobutanol terbesar yaitu mikroalga, ampas tebu, dan jerami padi (Gambar 5–7) menunjukkan adanya puncak butanol, namun terdapat beberapa senyawa yang belum teridentifikasi, diduga senyawa-senyawa tersebut adalah alkohol, isomer senyawa etanol-butanol-aseton, pecahan asam (butirat/asetat), senyawa antara, dan/atau pengotor dari proses hidrolisis. Hasil kromatogram mikroalga menunjukkan senyawa pengotor paling sedikit

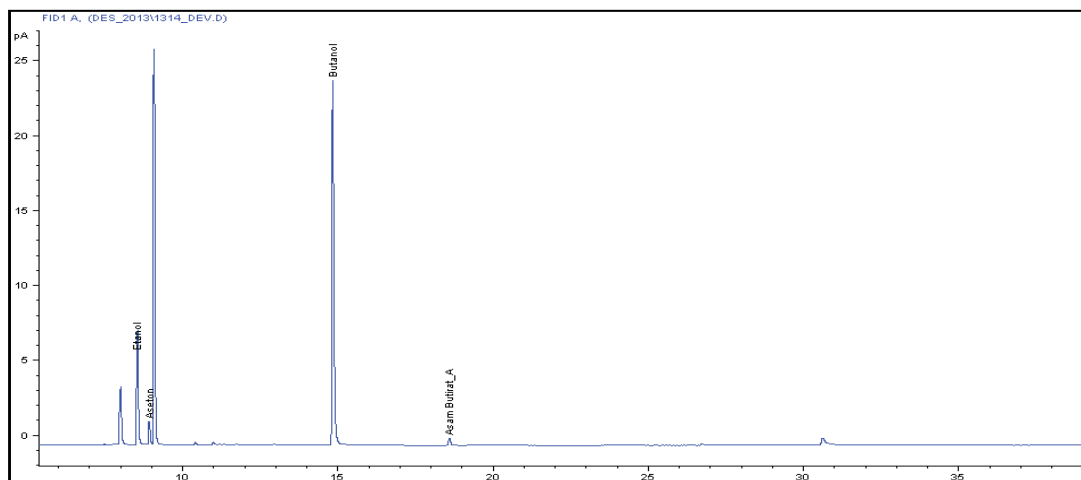
dibandingkan kromatogram ampas tebu dan jerami padi. Sedangkan pada kromatogram ampas tebu dan jerami padi menunjukkan jumlah senyawa pengotor yang relatif sama.

Biobutanol yang dihasilkan dari penelitian ini belum merupakan butanol murni sehingga belum memenuhi persyaratan bahan bakar kendaraan (fuel grade butanol) sesuai dengan ASTM D 7862-13, yaitu konsentrasi butanol > 96%. Upaya yang dapat dilakukan untuk meningkatkan konsentrasi biobutanol antara lain dengan optimasi produksi, separasi dan purifikasi biobutanol dari hasil fermentasi yang lebih baik, serta metabolic engineering terhadap biakan bakteri yang digunakan pada fermentasi biobutanol tersebut.

Tabel 2.
Hasil Fermentasi Biomassa

Biomassa	Konsentrasi (% berat)			
	Aseton	Biobutanol	Bioetanol	Asam Butirat
Ampas tebu	1,79	23,27	1,03	1,09
Jerami padi	2,16	7,94	3,97	20,27
Mikroalga	0,85	40,24	3,31	0,89
Tongkol Jagung	0,06	0,05	0,92	TD
Pulp	0,02	0,01	0,57	TD
TKKS	0,33	0,44	0,07	TD

TD = Tidak dilakukan analisis



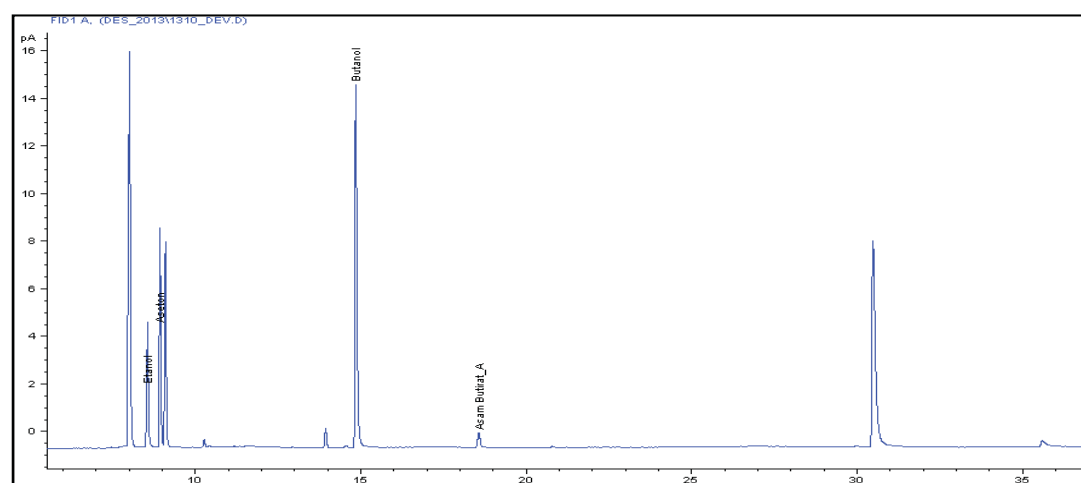
Gambar 5.
Kromatogram Hasil Destilasi dari Fermentasi Mikroalga

Uji Coba Mini Pilot Biobutanol Terpadu

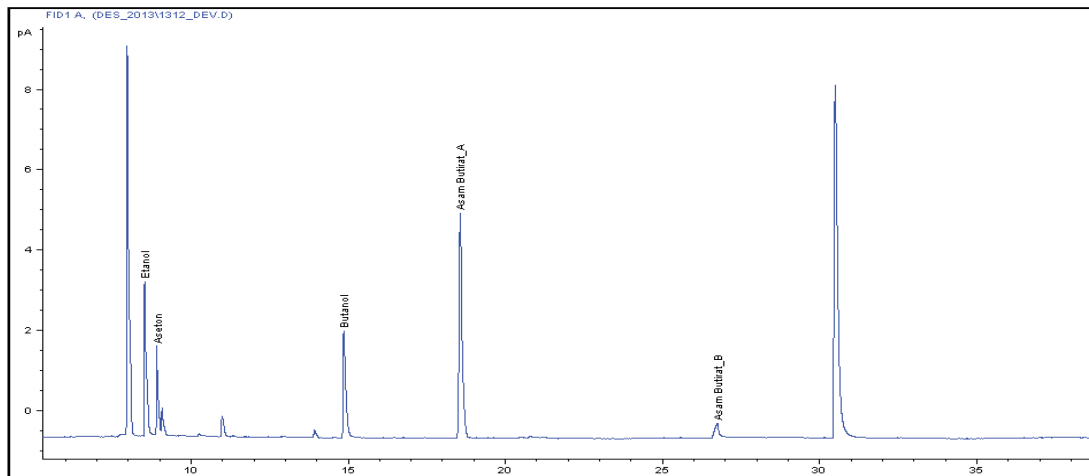
Uji peralatan mini pilot biobutanol terpadu dilakukan dengan menggunakan larutan 6 % glukosa standar. Pada uji ini terdapat permasalahan yaitu input bakteri belum dapat secara anaerob dan steril. Kondisi anaerob dan steril sangat penting mengingat bakteri *C. acetobutylicum* maupun *C. beijerinckii* obligat anaerob dan rentan terhadap kontaminasi. Untuk mengatasi hal tersebut dilakukan penambahan sistem input biakan bakteri agar tetap anaerob dan bebas kontaminasi. Permasalahan lain, adalah pecahnya selang pada pompa peristaltik dalam sistem pelucutan gas akibat timbulnya panas dari motor penggerak yang merambat ke selang. Hal ini

juga berakibat pada pemakaian gas N₂ yang sangat banyak yang seharusnya dengan sistem sirkulasi gas N₂, pemakaian nitrogen hanya diperlukan pada awal flushing dan pada awal pelucutan gas. Untuk mengatasinya, diperlukan perbaikan pada motor penggerak pompa peristaltik agar tidak timbul panas.

Hasil beberapa kali percobaan telah diperoleh kondisi operasi fermentasi menggunakan sistem biobutanol terpadu, secara umum yaitu: suhu fermentasi ± 35°C, fermentasi sistem lompok 24 jam, pelucutan gas 48 jam, aliran gas N₂ kontinu, 10 % biakan bakteri dalam media TGY, dengan penambahan media P2 dan ekstrak ragi sebagai nutrisi pertumbuhan bakteri. Kondisi operasi tersebut



Gambar 6.
Kromatogram Hasil Destilasi dari Fermentasi Ampas Tebu



Gambar 7.
Kromatogram Hasil Destilasi dari Fermentasi Jerami Padi

sebagai dasar pengoperasian reaktor biobutanol terpadu dengan menu utamaseperti pada Gambar 8.

Pada bagan alir menu utama reaktor tersebut terdapat beberapa menu yaitu service menu untuk perbaikan koreksi program kondisi operasi; saccharification menu untuk proses hidrolisis enzim menggunakan biomassa selulosa; dan fermentation menu untuk proses fermentasi sampai dengan pemisahan (gas stripping). Menu fermentasi tersedia dalam dua macam yaitu *fed-batch* (sistem umpan) dan *batch* (sistem lompok). Meski uji coba peralatan reaktor biobutanol terpadu ini masih perlu beberapa perbaikan, namun rancang bangun ini merupakan langkah maju karena proses produksi biobutanol dari hidrolisis biomassa sampai separasi produk dapat dilakukan dalam satu reaktor terpadu secara otomatis. Hal ini sangat penting untuk aplikasi skala industri.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Biomassa yang paling berpotensi untuk dijadikan bahan baku biobutanol adalah mikroalga, ampas tebu, dan jerami padi. Sedangkan dari biomassa lainnya, masih diperlukan upaya-upaya optimasi. Reaktor mini pilot biobutanol terpadu telah mampu menghasilkan biobutanol, namun masih diperlukan perbaikan pada sistem vakum, motor pompa peristaltik, dan penyempurnaan sistem pelucutan gas. Dengan demikian, reaktor biobutanol terpadu ini dapat digunakan sebagai dasar pengembangan bahan bakar nabati skala industri.

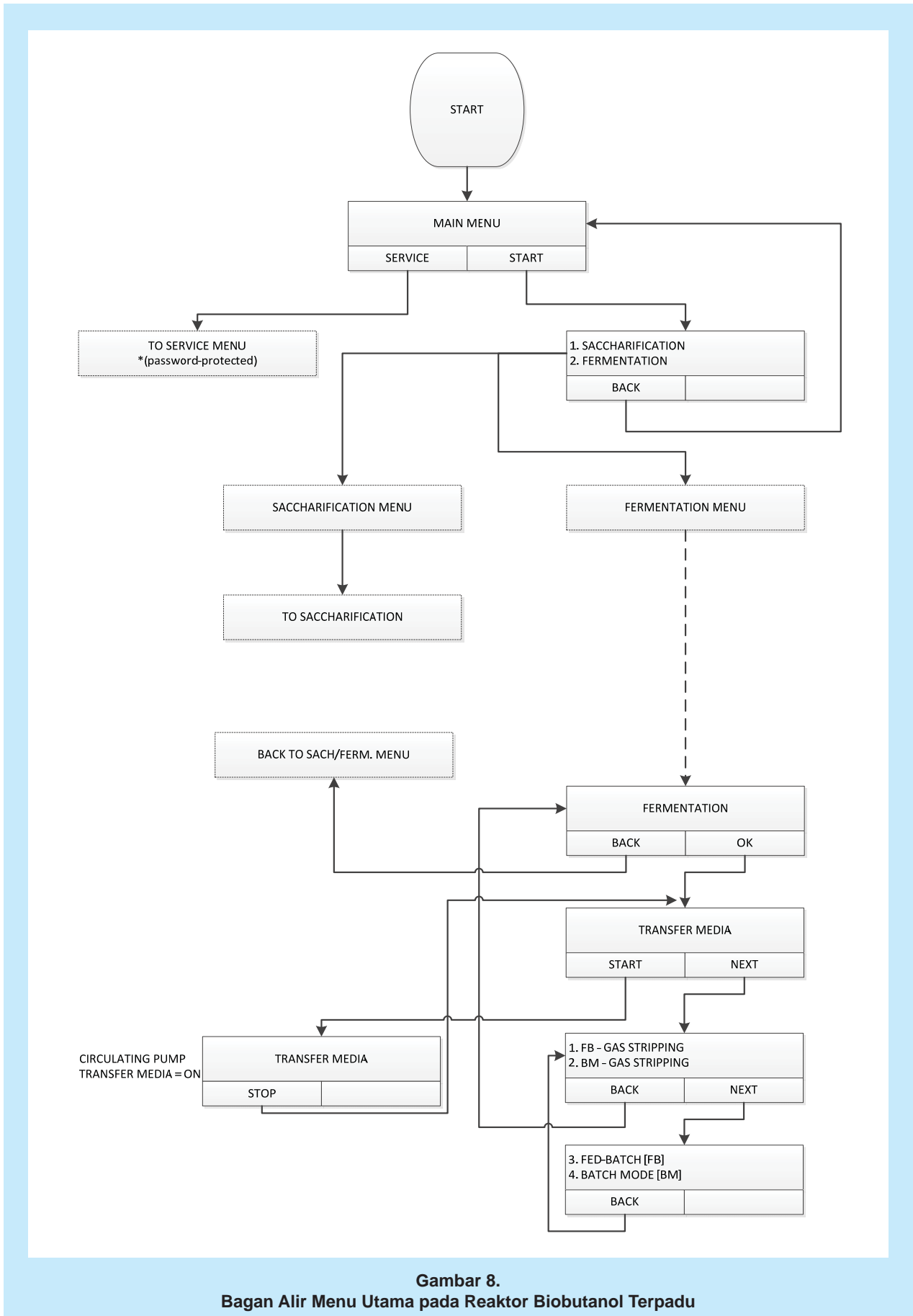
UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didukung oleh pemerintah di bawah Program Pembinaan Usaha Pertambangan Migas.

KEPUSTAKAAN

- Aleksic, S., 2009.** "Butanol Production from Biomass", Thesis, Chemical Engineering, Youngstown State University, US.
- Deng, B., Fu, J., Zhang, D., Yang, J., Feng, R., Liu, J., Li, K., and Liu, X., 2013.** "The heat release analysis of bio-butanol/gasoline blends on a high speed SI (spark ignition) engine". *Energy*, 60: 230-241.
- Dürre, P. 2008.** "Fermentative Butanol Production, Bulk Chemical and Biofuel", *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 1125: 353-362
- Ezeji, T.C., Karcher, P.M., Qureshi, N., and Blaschek, H.P. 2005.** "Improving Performance of a Gas Stripping-based Recovery System to Remove Butanol from Clostridium beijerinckii Fermentation". *Bioprocess Biosyst Eng*, 27 207-214.
- Ezeji, T.C., Qureshi, N., and Blaschek, H.P. 2007.** "Bioproduction of Butanol from Biomass: from Gene to Bioreactors", *Current Opinion in Biotechnology*, Vol. 18, 220-227.
- Fajariah, H.D., dan Hadi W., 2014. "Pemanfaatan

2. Produksi Biobutanol Sebagai Bahan Bakar Terbarukan Melalui Proses Fermentasi.
(Yanni Kussuryani dan Devitra Saka Rani)



Gambar 8.
Bagan Alir Menu Utama pada Reaktor Biobutanol Terpadu

Serbuk Gergaji menjadi Biobutanol dengan Hidrolisis Selulase dan Fermentasi Bakteri *Clostridium acetobutylicum*”, *Jurnal Teknik Pomits*, Vol. 3, No. 2, F 276-280.

Kumar, M., and Gayen, M., 2011. “Developments in biobutanol production: New insights”, *Applied Energy*, 88 :1999–2012.

Merola, S.S., Tornatore, C., Marchitto, L., Valentino, G., and Corcione, F.E., 2012. “Experimental investigation of butanol-gasoline blends effect on the combustion process in a SI engine”. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 3: 6.

Ndaba, B., Chiyanzu, I., and Marx, S., 2015. “n-Butanol derived from biochemical and chemical routes: A review”, *Biotechnology Reports* 8, 1–9.

Qureshi, N., T.C. Ezeji, J. Ebener, B.S. Dien, M.A. Cotta, and Blaschek, H.P., 2008. “Butanol Production by *Clostridium beijerinckii*. Part I: Use of Acid and Enzyme Hydrolyzed Corn Fiber”. *Bioresource Technology*, 99: 5915– 5922.

Rani, D.S. and Sari, C.N. 2012. “Dilute Acid Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis of Lignocellulosic Biomass for Butanol Production as Biofuel”. *Scientific Contributions Oil and Gas*, 35(1): 39-48

Semar, D., dan Yuliarita, E., 2011, “ Meramu Bensin Ramah Lingkungan dengan Pemanfaatan Butanol”, *Lembaran Publikasi LEMIGAS*, Vol. 45, 1-10.

Servinsky, M.D., Kiel, J.T., Dupuy, N.F., and Sund, C.J., 2010. “ Transcriptional analysis of differential carbohydrate utilization by *Clostridium acetobutylicum*”, *Microbiology*, 156: 3478–3491

Yalun, A., Tanudjaja, E., Dimiyati, A., and Pinontoan, R. 2014. “Second Generation Biofuel from Cellulosic Agricultural By-product Fermentation Using *Clostridium* Species for Electricity Generation”. *Energy Procedia* 47: 310 – 315.