

PEMBUATAN BIOETANOL DARI LIGNOSELULOSA TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT MENGGUNAKAN PERLAKUAN AWAL IRADIASI BERKAS ELEKTRON DAN NaOH

(PREPARATION OF BIOETHANOL FROM OIL PALM EMPTY FRUIT BUNCH LIGNOCELLULOSE USING ELECTRON BEAM IRRADIATION AND NaOH PRETREATMENT)

Darsono dan Made Sumarti

Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi - BATAN
Jl. Lebak Bulus Raya No. 49, Jakarta Selatan

E-mail : darsono@batan.go.id

Received : 6 Juni 2014 ; revised : 22 Agustus 2014 ; accepted : 1 Oktober 2014

ABSTRAK

Proses pembuatan bioetanol dari serat tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dilakukan menggunakan dua metode. Pada metode pertama, perlakuan pendahuluan diawali dengan iradiasi TKKS menggunakan berkas elektron pada dosis 100 kGy, 200 kGy, 300 kGy, dan 400 kGy, kemudian proses kimia (NaOH), dilanjutkan dengan proses *Simultaneous Saccharification Fermentation* (SSF). Metode kedua, perlakuan pendahuluan menggunakan NaOH dan iradiasi kemudian dilanjutkan dengan proses SSF. Proses sakarifikasi dilakukan menggunakan enzim selulase dan selubiose, sedangkan proses fermentasi dilakukan menggunakan khamir *Saccharomyces cerevisiae*. Perlakuan dosis radiasi, konsentrasi NaOH, dan aktivitas enzim dipakai untuk menentukan konsentrasi etanol yang dihasilkan. Penggunaan serat TKKS dengan perlakuan NaOH 6% dan iradiasi berkas elektron dengan dosis 200 kGy menghasilkan kadar etanol maksimum 6,55 g/L dengan rendemen 12,36%.

Kata kunci : Iradiasi, Berkas elektron, *Simultaneous saccharification fermentation*, Etanol, Glukosa

ABSTRACT

Research on preparation of bioethanol from oil palm empty fruit bunches (OPEFB) was carried out in two methods. In the first method, pretreatment was conducted by electron beam irradiation of OPEFB at the doses of 100 kGy, 200 kGy, 300 kGy, and 400 kGy, and then chemical process (NaOH) followed by the simultaneous saccharification fermentation (SSF). For the second method, pretreatment was done using NaOH and irradiation, followed by SSF process. Saccharification was done using the cellulase and celubiase enzymes, while fermentation was done using *Saccharomyces cerevisiae* yeast. Treatment of radiation dose, concentration of NaOH, and enzyme activity were used to determine the concentration of ethanol produced. The use of OPEFB fiber with 6% NaOH treatment and electron beam irradiation at the dose of 200 kGy resulted in a maximum ethanol content of 6.55 g/L with a yield of 12.36%.

Key words : Irradiation, Electron beam, *Simultaneous saccharification fermentation*, Ethanol, Glucose

PENDAHULUAN

Penggunaan sumber energi terbarukan berupa bahan bakar nabati (BBN) perlu ditingkatkan. Mengingat sumber bahan bakar yang berasal dari fosil terbatas dan bahan bakar tersebut mahal, mendorong berbagai penelitian dan pengembangan untuk mendapatkan bahan bakar yang lebih murah, ramah lingkungan, dan

dari bahan alam yang sifatnya terbarukan. Bahan bakar tersebut adalah biodiesel dan bioetanol. Pada umumnya, bioetanol dibuat dari glukosa melalui konversi kimia atau fermentasi. Selain dari karbohidrat, bioetanol dapat dibuat dari bahan berbasis selulosa dengan hidrolisis menggunakan asam organik atau enzim, dilanjutkan dengan proses fermentasi. Alternatif bahan non pangan yang cukup potensial untuk

dikembangkan sebagai sumber bahan bakar nabati adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS). TKKS yang merupakan limbah industri sampai saat ini belum dimanfaatkan secara optimal dan sering menimbulkan pencemaran lingkungan. Saat ini, pemanfaatan TKKS terbatas dan hanya dipakai sebagai pupuk, bahan baku matras, dan media tumbuh tanaman jamur (Irawati 2006). Oleh karena itu, perlu diupayakan agar limbah TKKS dapat menjadi produk yang lebih bermanfaat. TKKS merupakan limbah terbesar pada industri kelapa sawit, yaitu mencapai 22% sampai dengan 25% dari bobot buah segar (Purwantana dkk. 2011; Subiyanto dkk. 2004). Menurut Syafina *et al.* (2002), TKKS mengandung selulosa 41,3% sampai dengan 46,5%; hemiselulosa 25,3% sampai dengan 33,8%; dan lignin 27,6% sampai dengan 32,5%.

Kandungan selulosa dan hemiselulosa dalam TKKS berpotensi dapat digunakan sebagai sumber gula pereduksi melalui proses kimiawi atau enzimatis. Larutan gula yang dihasilkan dapat dikonversi menjadi beberapa produk seperti alkohol, aseton, butanol, dan produk yang mempunyai nilai ekonomi tinggi (Darnoko 2001). Kendala yang dihadapi dalam hidrolisis dan fermentasi adalah adanya kandungan lignin dalam serbuk, bobot molekul yang tinggi, ikatan hidrogen, dan struktur kristalin (Della *et al.* 1982). Faktor-faktor penghambat tersebut perlu dihilangkan atau dikurangi dengan perlakuan pendahuluan. Perlakuan pendahuluan dapat menjadi proses yang sangat penting dan berpotensi membutuhkan biaya yang mahal (Shin *et al.* 2008). Salah satu perlakuan tersebut adalah dengan radiasi energi tinggi untuk mendegradasi lignoselulosa (Wasikiewicz *et al.* 2005). Sebagai contoh, penggunaan radiasi berkas elektron dapat memecah rantai (degradasi) dan mengubah struktur mikro serat nenas (*Cannabis sativa* L) sehingga meningkatkan hidrolisis enzimatis (Shin *et al.* 2008). Selain itu, perlakuan berkas elektron dan penggilingan menyebabkan jerami lebih mudah terhidrolisis oleh enzim (Kojima *et al.* 1983).

Penggunaan radiasi berkas elektron pada perlakuan awal TKKS untuk proses degradasi dapat memecah ikatan hidrogen pada selulosa, sedangkan penggilingan menurunkan bobot molekul dan kristalinitas (Sugiarto *et al.* 2012).

Perlakuan awal dengan NaOH encer menyebabkan pemekaran selulosa. Pemekaran selulosa akan meningkatkan luas permukaan lignoselulosa, menurunkan derajat polimerisasi, mengurangi area kristalinitas, terjadi pemisahan ikatan lignin dan karbohidrat, atau menurunkan kadar lignin di dalam lignoselulosa. Beberapa penelitian yang dilakukan oleh Millet *et al.* (1999)

menyatakan bahwa perlakuan NaOH pada kayu keras dapat meningkatkan daya cerna enzim terhadap selulosa dari 14% menjadi 55%, diikuti pengurangan kadar lignin dari kisaran 24% sampai dengan 55% menjadi 20%. Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Darsono *et al.* (2013) dengan judul pengaruh radiasi berkas elektron dan kimia pada pembuatan glukosa dari TKKS, hasil percobaan perlakuan awal dengan iradiasi dan NaOH menghasilkan glukosa lebih tinggi apabila dibandingkan dengan perlakuan dengan asam.

Penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan limbah TKKS sebagai bahan baku untuk pembuatan bioetanol dengan perlakuan pendahuluan iradiasi dan kimia (NaOH). Parameter yang diukur meliputi kadar bioetanol dan kadar glukosa menggunakan *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC).

BAHAN DAN METODE

Bahan dan Alat

TKKS diperoleh dari PT Perkebunan Nusantara VIII (Pandeglang, Banten), *Potato Dextrose Agar* (PDA), glukosa, khamir, NaOH, KH_2PO_4 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $(\text{NH}_4)_2\text{PO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, natrium sitrat, dan selulase dengan nama dagang Meilase (produksi PT Meiji), selubiose, dan *S. cerevisiae*. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain mesin berkas elektron (2 MeV, 10 mA), penggiling, ayakan, otoklaf, *water bath* yang dilengkapi dengan *shaker*, inkubator, dan HPLC Waters 87 (dengan detektor RI).

Metode

Perlakuan Awal

Perlakuan awal pada pembuatan bioetanol dilakukan dengan dua metode. Serat TKKS dicuci, dipotong dengan ukuran 1 cm sampai dengan 2 cm kemudian dikeringkan. Metode pertama, potongan dikemas dalam plastik kemudian diiradiasi berkas elektron pada dosis 100 kGy, 200 kGy, 300 kGy, dan 400 kGy. Sampel hasil iradiasi kemudian digiling, lalu diayak sehingga diperoleh TKKS dengan kehalusan 40/60 mesh. Sebagian sampel dimasukkan ke dalam botol *Schott*, kemudian ditambahkan larutan NaOH 4%, setelah itu dipanaskan menggunakan *autoclave* pada suhu 121°C selama 60 menit. Sampel tersebut kemudian dicuci dengan air panas sehingga pH netral, dikeringkan pada suhu 105°C, dan ditimbang sampai bobot tetap. Setelah itu, sampel disakarifikasi fermentasi simultan (SSF). Metode pertama dilakukan untuk menentukan dosis iradiasi berdasarkan data hasil bioethanol

yang tinggi, yang selanjutnya dipakai pada metode kedua.

Metode kedua, sampel direndam dalam NaOH dengan konsentrasi 2%, 4%, 6%, dan 8%, kemudian diiradiasi menggunakan berkas elektron dengan dosis optimum yang diperoleh dari metode pertama. Setelah itu, dilakukan proses sakarifikasi fermentasi simultan.

Proses Sakarifikasi dan Fermentasi Simultan (SSF)

Penumbuhan khamir *S. Cerevisiae* dilakukan menggunakan *PDA*, sedangkan inokulum khamir dibuat dari glukosa, khamir, dan campuran KH_2PO_4 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $(\text{NH}_4)\text{SO}_4$. Nutrien medium dibuat dari campuran natrium sitrat buffer $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $(\text{NH}_4)\text{SO}_4$, dan ekstrak khamir.

Pada proses *SSF*, ditimbang serat TKKS sebanyak 1 gram, dimasukkan ke dalam botol *Schott*, ditambahkan larutan buffer sitrat pH 5,5 sebanyak 3,427 mL dan nutrien medium sebanyak 10 mL, kemudian disterilkan menggunakan otoklaf pada suhu 121°C selama 15 menit. Setelah dingin, ditambahkan enzim selulase 1,33 mL (80 FPU), selubiose 0,54 mL (100 CBU), dan inokulum 1,7 mL. Campuran tersebut ditempatkan dalam inkubator yang dilengkapi dengan *shaker* pada suhu 32°C dan *shaker* digerakkan dengan kecepatan 120 rpm. Waktu inkubasi selama 72 jam.

Analisis Produk

Produk yang dihasilkan setelah proses *SSF*, terutama berupa etanol dan glukosa dianalisis menggunakan *HPLC Waters* 87 dengan detektor RI. Kecepatan alir sampel ke *HPLC* 0,6 mL/m dengan menggunakan eluen 0,005 M H_2SO_4 .

HASIL DAN PEMBAHASAN

Beberapa hasil pengukuran *HPLC* setelah proses sakarifikasi dan fermentasi terdapat pada Gambar 1 (larutan standar), Gambar 2 (TKKS dosis 100 kGy, perlakuan NaOH 4%), Gambar 3 (TKKS perlakuan NaOH 6% dengan dosis iradiasi 100 kGy), dan Gambar 4 (TKKS perlakuan NaOH 6% dengan dosis iradiasi 200 kGy). Hasil pengukuran secara kualitatif didasarkan pada waktu retensi. Waktu retensi adalah waktu yang dibutuhkan komponen dari mulai diinjeksikan sampai sampel terbaca oleh detektor. Pada Gambar 1 dapat dilihat *peak*

glukosa, asam asetat, dan etanol yang masing-masing muncul berturut-turut pada waktu retensi 9 menit sampai dengan 10,5 menit, 15 menit sampai dengan 16 menit, dan 22 menit sampai dengan 23,5 menit, dengan luas area 9,516; 15,468; dan 22.582. Sedangkan pengukuran secara kuantitatif dapat dihitung dengan menggunakan luas area. Luas area yang dihasilkan berhubungan atau erat kaitan dengan konsentrasi komponen yang dianalisis. Semakin besar konsentrasi, semakin besar pula luas area.

Gambar 2, Gambar 3, dan Gambar 4 menunjukkan ada *peak* etanol, glukosa, dan asam asetat, dengan waktu retensi hampir sama dengan munculnya *peak* larutan standar glukosa, asam asetat, dan etanol yang tertera pada Gambar 1. Tinggi rendahnya kadar etanol, glukosa, dan asam asetat ditunjukkan oleh bilangan yang terdapat pada gambar tersebut. Nilai luas area glukosa, etanol, dan asam asetat pada Gambar 2 berturut-turut adalah 9,631; 20,017; dan 15,621. Sedangkan TKKS dengan perlakuan awal NaOH 6% dan iradiasi 200 kGy yang tertera pada Gambar 4, kandungan glukosa, etanol, dan asam asetat ditunjukkan pada waktu retensi yang sama seperti pada larutan standar, perbedaannya terlihat pada luas areanya. Luas area glukosa, etanol, dan asam asetat tersebut berturut-turut adalah 9,906; 19,984; dan 15,957. Nilai bilangan pada area ini dipakai sebagai dasar untuk perhitungan kadar bahan-bahan yang terdapat dalam sampel.

Konsentrasi glukosa, etanol, dan asam asetat ditentukan menggunakan rumus :

$$[\text{Glu}] \frac{\text{g}}{\text{L}} = \frac{[\text{Glu std}]}{[\text{Area std}]} \times \text{Area spl} \frac{\text{g}}{\text{L}} \quad \text{.....(1)}$$

Keterangan :

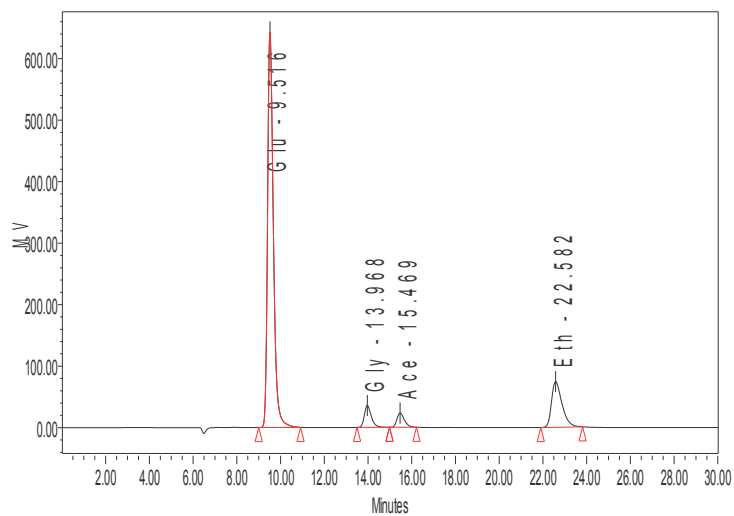
[Glu] g/L = kadar glukosa (g/L)

[Glu] std = glukosa standar (g/L)

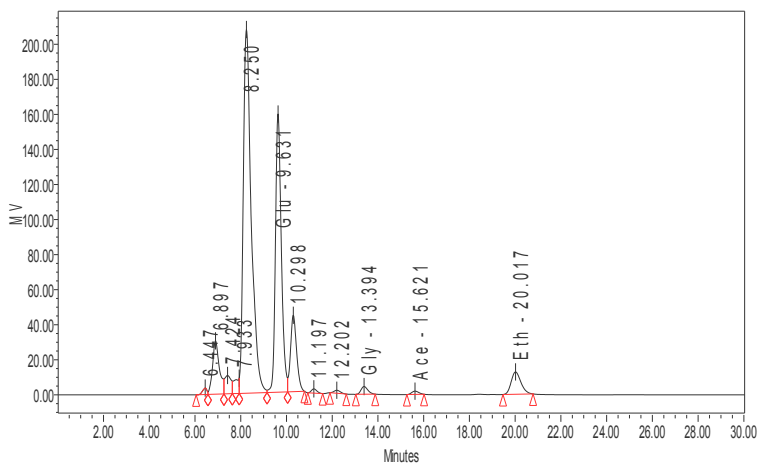
[Area std] = luas area standar

[Area spl] = luas area sampel

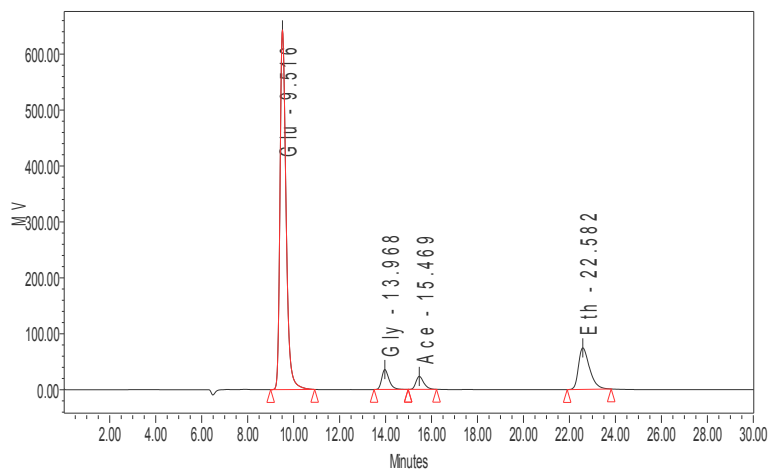
Dari hasil perhitungan tersebut, dapat diketahui konsentrasi bahan yang terdapat dalam larutan setelah proses *SSF*, dan hasil disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2. Perhitungan berdasarkan pada kondisi sebagai berikut, konsentrasi standar glukosa = 50,003 g/L, etanol = 25,907 g/L, dan asam asetat = 5,156 g/L.



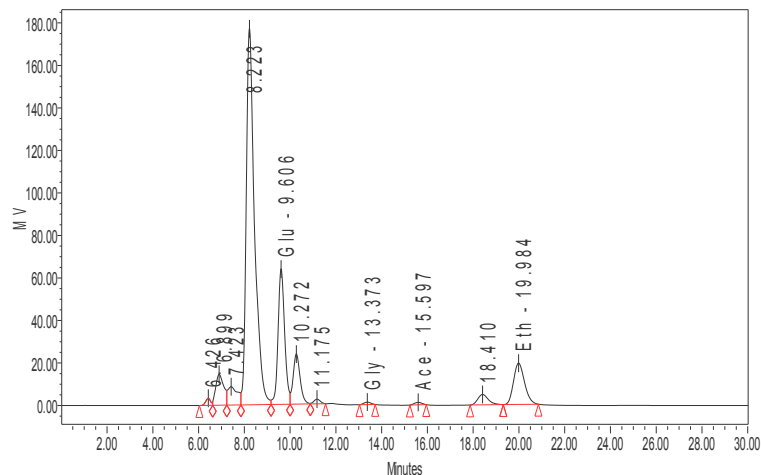
Gambar 1. Larutan standar glukosa, etanol, dan asam asetat



Gambar 2. TKKS dengan perlakuan iradiasi 100 kGy dan NaOH 4



Gambar 3. TKKS dengan perlakuan awal NaOH 6% dan iradiasi dosis 100 kGy



Gambar 4. TKKS dengan perlakuan awal NaOH 6% dan iradiasi dosis 200 kGy

Pada penelitian sebelumnya (Darsono *et al.* 2013), sakarifikasi enzimatis TKKS menggunakan enzim selulase (Meiji) dan selubiose dengan perlakuan awal iradiasi dan NaOH 4%, menghasilkan glukosa yang optimal. Apabila biomassa dilakukan *treatment* dengan NaOH encer, luas permukaan internal bahan meningkat dan membesar. Pembesaran luas permukaan menyebabkan penurunan derajat polimerisasi, pemisahan ikatan struktur antara lignin dan karbohidrat, dan merusak struktur lignin (Fan *et al.* 1987).

Berdasarkan penelitian tersebut, maka percobaan ini dilakukan dengan kombinasi perlakuan awal iradiasi dan kimia. Pada percobaan metode 1, sakarifikasi fermentasi simultan lignoselulosa TKKS dilakukan dengan perlakuan awal iradiasi berkas elektron dilanjutkan dengan perlakuan NaOH 4%. Sebagai blangko, dilakukan proses SSF terhadap TKKS tanpa perlakuan awal.

Tabel 1 terlihat bahwa TKKS dengan perlakuan awal iradiasi 100 kGy dan 200 kGy dengan perendaman NaOH 4% menghasilkan kandungan bioetanol masing-masing sebesar 2,21 g/L dan 1,95 g/L, lebih tinggi apabila dibandingkan dengan TKKS tanpa perlakuan awal (kontrol) maupun TKKS dengan perlakuan awal NaOH 4% saja tanpa iradiasi, yaitu berturut turut kandungan etanol adalah 0,821 g/L dan 1,87 g/L (NaOH 4%). Hal tersebut disebabkan TKKS tanpa perlakuan awal masih belum mengalami degradasi dan mengandung hemiselulosa serta lignin yang menutupi selulosa, sehingga selulosa sukar untuk mengabsorpsi enzim pada saat sakarifikasi dan fermentasi sehingga etanol yang dihasilkan tidak maksimal. Tabel 1 tersebut juga menunjukkan

bahwa perlakuan iradiasi 100 kGy dan 200 kGy pada metode pertama, etanol yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan dengan iradiasi pada dosis 300 kGy dan 400 kGy, yaitu berturut-turut adalah 0,94 g/L dan 0,97 g/L. Hal ini disebabkan pada dosis yang lebih tinggi, selulosa dan hemiselulosa mudah larut dalam NaOH, sehingga glukosa yang dihasilkan lebih sedikit dan mengakibatkan hasil bioetanol yang diperoleh lebih rendah. Dengan demikian, dosis iradiasi 100 kGy dan 200 kGy merupakan dosis yang menghasilkan etanol tinggi, sehingga digunakan pada proses selanjutnya (metode kedua).

Berdasarkan penelitian terdahulu, radiasi dapat menyebabkan berkurangnya berat molekul selulosa. Semakin tinggi dosis radiasi berkas elektron, semakin rendah berat molekul selulosa (Charlesby 1995). Perlakuan awal dengan iradiasi berkas elektron meningkatkan efisiensi energi dan lebih ramah lingkungan untuk mengurangi berat molekul, kristalinitas dari selulosa, dan meningkatkan luas permukaan dari selulosa (Sugiarto *et al.* 2012).

Metode kedua, TKKS direndam dalam larutan NaOH 2%, 4%, 6%, dan 8% selama 60 menit pada suhu 121°C menggunakan otoklaf. Setelah dicuci, dikeringkan, dan dikemas, baru kemudian diiradiasi. Selanjutnya, dilakukan proses SSF menggunakan enzim selulase, selubiose, dan khamir *S. Cerevisiae*. Proses SSF TKKS tersebut ternyata menghasilkan bioetanol lebih tinggi apabila dibandingkan dengan metode pertama. Kadar bioetanol, glukosa, dan asam asetat disajikan pada Tabel 2. Kadar etanol maksimum sebesar 6,152 g/L pada konsentrasi NaOH 6% dan dosis 100 kGy, sedangkan pada konsentrasi NaOH yang sama dengan dosis

200kGy diperoleh sedikit lebih tinggi yaitu sebesar 6,55 g/L dengan rendemen 12,36%. Dengan demikian disimpulkan bahwa, sintesis bioetanol dari TKKS yang diproses secara SSF diperoleh kondisi optimum dengan perlakuan awal NaOH 6% dan iradiasi 200 kGy. Dengan demikian diduga bahwa, perlakuan NaOH pada proses metode kedua, perlakuan awal yang dikombinasikan dengan iradiasi dapat meningkatkan kelarutan TKKS, sehingga dapat melarutkan sebagian hemiselulosa dan menurunkan kandungan lignin. Dalam hal ini, iradiasi lebih efektif karena dapat mempermudah adsorpsi enzim selulase ke permukaan selulosa mengakibatkan proses degradasi selulosa menjadi gula yang dapat difermentasi lebih optimal. Penggunaan 90 kW, 3 MeV Dynamitron menyebabkan berat molekul dari selulosa berkurang dari 82000 Da menjadi 5000 Da dengan dosis 100 kGy (Driscoll *et al.* 2009). 1 kGy diartikan sebagai penyerapan energi 1 Joule per gram biomassa.

Pada penelitian lain (Triwahyuni *et al.* 2013) menggunakan TKKS yang diiradiasi dengan berkas elektron pada dosis 100 kGy sampai dengan 500 kGy kemudian dihidrolisis dengan enzim C-tec₂, selanjutnya glukosa yang dihasilkan difermentasi dengan ragi. Penelitian tersebut menghasilkan etanol 2,3% b/b diperoleh menggunakan substrat TKKS iradiasi dosis 500 kGy, sedangkan TKKS tanpa radiasi (kontrol) menghasilkan etanol 1,21 % b/b.

Pada penelitian ini, hanya terjadi konversi glukosa menjadi etanol dengan menggunakan *S. cerevisiae* sehingga diduga xilosa masih ada di dalam produk fermentasi. Selain etanol, larutan tersebut masih mengandung asam asetat maksimum 0,636 g/L atau sekitar 1,82% dan glukosa sebesar 0,4 g/L sampai dengan 11,76 g/L atau maksimum 22% terhadap berat serat TKKS. Hal ini diduga bahwa proses fermentasi berlangsung kurang sempurna atau *S. cerevisiae* aktivitasnya telah menurun sebelum proses berakhir.

Tabel 1. Kandungan bioetanol, glukosa, dan asam asetat hasil SSF dengan perlakuan awal iradiasi dan NaOH serta tanpa perlakuan awal

Perlakuan awal TKKS		Bioetanol		Glukosa		Asam asetat	
Dosis iradiasi, kGy	Konsentrasi NaOH, %	Kadar, g/L	Yield, (%)	Kadar, g/L	Yield, (%)	Kadar, g/L	Yield, %
0	4%	1,872	3,58	1,62	3,10	0,124	0,22
100	4%	2,211	4,23	4,53	8,67	0,192	0,38
200	4%	1,951	3,73	4,71	9,02	0,527	0,79
300	4%	0,942	1,79	3,14	6,00	0,136	1,18
400	4%	0,973	1,85	3,19	6,10	0,268	0,87
TKKS tanpa perlakuan awal		0,821	1,62	4,51	8,60	0,104	0,20

Tabel 2. Kadar bioetanol, glukosa, dan asam asetat dari TKKS menggunakan proses sakarifikasi fermentasi simultan dengan perlakuan awal NaOH dilanjutkan dengan iradiasi berkas elektron.

Perlakuan awal		Bioetanol		Glukosa		Asam asetat	
Konsentrasi NaOH, (%)	Dosis iradiasi, kGy	Kadar, g/L	Yield, (%)	Kadar, g/L	Yield, (%)	Kadar, g/L	Yield, %
0	100	1,76	3,37	0,504	0,94	0,114	0,21
2	100	3,255	5,14	0,401	0,50	0,292	0,38
4	100	3,803	7,18	13,13	24,54	0,427	0,79
6	100	6,152	11,61	8,773	16,40	0,636	1,182
8	100	3,716	4,68	10,843	20,27	0,468	0,87
0	200	2,476	8,12	2,564	4,79	0,352	0,35
2	200	3,796	7,16	11,765	13,54	0,606	1,13
4	200	3,256	6,14	9,229	10,62	0,284	0,53
6	200	6,550	12,36	5,744	6,64	0,166	0,31
8	200	3,385	7,32	8,378	9,69	0,374	0,70

KESIMPULAN

Iradiasi berkas elektron pada dosis iradiasi antara 100 kGy sampai dengan 200 kGy meningkatkan kadar etanol yang dihasilkan. Metode kedua, perlakuan awal NaOH 6% dan iradiasi lebih baik dibandingkan metode pertama, dilihat dari perolehan bioetanol pertama dengan perlakuan awal iradiasi dan perendaman NaOH 4%. Hasil yang diperoleh menggunakan metode kedua, perlakuan awal dengan NaOH 6% dan dilanjutkan iradiasi 200 kGy setelah proses SSF menghasilkan kadar etanol maksimum 6,55 g/L dengan rendemen 12,36 %.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Meiji Indonesia, yang telah memberikan enzim meilase. Juga kepada Prof. Ir. Sugiarto dan Drs. Harsojo, atas saran dan kerjasama yang baik dalam penelitian ini. Serta kepada Santoso P. dan Akhmad Rasyid S. yang telah membantu penyiapan bahan penelitian dan kepada seluruh staf dan operator mesin berkas elektron GJ-2, Balai Instalasi Fasilitas Iradiasi, PAIR-BATAN, yang telah memberikan layanan iradiasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Charlesby, A. 1995. Degradation of cellulose by ionizing radiation. *J. Polym. Sci.* 15 : 263-270.
- Darnoko. 2001. Teknologi produksi biodiesel dan prospek pengembangan di Indonesia. *WARTA PPKS* 9 (1) : 17-27.
- Darsono, S. Danu, M.S. Kardha, dan Harsojo. 2013. Pengaruh radiasi berkas elektron pada pembuatan glukosa dari tandan kosong sawit. *Jurnal Kimia dan Kemasan* 35 (1) : 52-57.
- Della Rosa, A.M., A.S.D. Mines, R.B. Banzon, and Z.F.S. Nuguid. 1982. Radiation pretreatment of cellulose for energy production. *Radiat. Phys. Chem.* 22 (3-5) : 901-906.
- Driscoll, A., A. Stipanovic, W. Witer, K. Cheng, M. Manning, J. Spiese, R.A. Galloway, and M.R. Cleland. 2009. Electron beam irradiation of cellulose. *Radiat. Phys. Chem.* 78 : 539-542.
- Fan, L.T., M.M.Gharapuray, and Y.H. Lee. 1987. *Design and economics evaluation of cellulose hydrolysis processes*. New York : Springer-Verlag.
- Himpunan Kimia Indonesia. 2013. Pengaruh perlakuan awal iradiasi berkas elektron terhadap proses hidrolisis enzimatis pada pembuatan bioetanol dari tandan kelapa sawit. *Dalam* : Triwahyuni, E., Muryanto, I. Fitriani, dan Y. Sudiyani. *Prosiding Seminar Nasional Kimia Terapan Indonesia*. Bandung : Pusat Penelitian Kimia LIPI : 73-78.
- Irawati, D. 2006. *Pemanfaatan serbuk kayu untuk pembuatan etanol*. Thesis. Institut Pertanian Bogor Fakultas MIPA, Bogor. Indonesia.
- Kojima, A., S. Miyake, and I. Uda. 1983. Effect of irradiation as a pretreatment in enzymatic hydrolysis of cellulose materials. *Radiat. Phys. Chem.* 22 (3-5) : 901-906.
- Millet, M.A., A.J. Baker, and L.D. Scetter. 1999. Physical and chemical pretreatment for enhancing cellulose saccharification. *Biotech Bioeng Symp* 6 : 125-153.
- Pusat Penelitian dan Pengembangan Perkebunan. 2011. Gratifikasi tandan kosong kelapa sawit : konversi limbah tandan kosong kelapa sawit untuk sumber energi terbarukan. *Dalam* : Purwantana, B. dan B. Prastowo. *Prosiding Seminar Nasional Inovasi Perkebunan*. Bogor : Pusat Penelitian dan Pengembangan Perkebunan : 197-205
- Shin, S.J. and Y.J. Sung. 2008. Improving enzymatic hydrolysis of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) by electron beam irradiation. *Radiat. Phys. Chem.* 77(9) : 1034-1038.
- Subiyanto, B., B. Subiyakto, Sudiyo, M. Gopar, dan S.S. Munawar. 2004. Pemanfaatan limbah tandan kosong kelapa sawit dari industri pengolahan kelapa sawit untuk papan partikel dengan perekat penol formadehida. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis* 2 (2) : 99-102.
- Sugiarto, D., Harsoyo, Darsono, K.M. Sumarti, Marsongko, dan Oktoviani. 2012. Electron beam degradation of oil palm empty fruit bunch. *International Journal of Environment and Bioenergy* 3(3) : 168-179.
- Syafina, Y., T. Honda, M. Watanabe, and Kumahara. 2002. Pretreatment of Oil Palm Empty Bunch by White Rot Fungi for Enzymatic Saccharification. *Wood. Res.* 89 :19-20.

Wasikiewicz, J.M., F. Yossi, N. Nagasawa, R.A.
Wach, and H. Mitomo. 2005.
Degradation of chitosan and sodium

alginate by gamma radiation, chemical
and ultra violet methods. *Radiat. Phys.
Chem.* 73 : 287-289