

Pembuatan Bioetanol dari Pati Umbi Uwi (*Discorea alata*) melalui Proses Fermentasi dan Distilasi

Hargono*

Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
Jl. Prof. H. Soedarto, SH., Tembalang, Semarang, 50275, Indonesia
Email: hargono@che.undip.ac.id

Abstrak

Bioetanol adalah nama lain etanol yang dapat dibuat dari bahan baku biomasa. Tanaman Uwi (*Discorea alata*) mudah tumbuh di lereng-lereng gunung, hutan sebagai tanaman liar, namun tanaman ini ada yang sengaja ditanam orang. Tanaman Uwi mengandung karbohidrat cukup tinggi (32,64%) sehingga dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan bioetanol. Pada penelitian ini umbi Uwi terlebih dulu dibuat pati agar memudahkan terjadinya proses hidrolisis dan fermentasi. Proses pembuatan pati Uwi adalah dengan mengekstrak bubur (hasil parutan) Uwi menggunakan air. Proses hidrolisis dan fermentasi dilakukan secara serentak atau *Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF)*. Konsentrasi pati Uwi 200 g/L, konsentrasi enzim (Stargen™ 002) 1,5% (w/w), konsentrasi yeast 1,10% (w/w) dan pada suhu 30°C. Hasil proses *SSF* adalah konsentrasi bioetanol kadar rendah, sehingga agar kemurnian bioetanol meningkat perlu dilakukan distilasi. Proses distilasi menggunakan distilasi 2 tahap, terdiri dari 2 kolom, meliputi kolom 1 tanpa bahan isian dilengkapi pipa pendingin yang berbentuk spiral, sedangkan kolom 2 berisi bahan isian yaitu packing. Proses distilasi 2 tahap masing-masing ini dioperasikan pada suhu 78°C. Tujuan penelitian ini adalah mempelajari pengaruh waktu *SSF* terhadap konsentrasi bioetanol dan mempelajari waktu distilasi tahap 1 dan 2 terhadap konsentrasi bioetanol. Proses *SSF* dilakukan selama 90 jam. Hasil terbaik proses *SSF* dicapai selama 72 jam yang menghasilkan konsentrasi bioetanol 12,30%. Proses distilasi 1 dan 2 dilakukan masing-masing selama 105 menit. Hasil terbaik dari distilasi tahap 1 dan tahap 2 dicapai selama waktu masing-masing 90 menit, yaitu konsentrasi bioetanol 27,93% dan 85,30%. Perancangan alat distilasi 2 tahap ini layak digunakan sebagai alat pemurnian bioetanol hasil *SSF*.

Kata kunci : Pati Uwi, *SSF*, distilasi dua tahap, bioetanol

Abstract

Making Bioethanol from Uwi Tuber Starch (*Discorea alata*) through Fermentation and Distillation Processes

Bioethanol is another name for ethanol which can be made from biomass feedstock. The Uwi (*Discorea alata*) plant contains quite high carbohydrate (32,64%) so that it can be used as raw material for bioethanol production. The Uwi tubers were made starch in order to facilitate the hydrolysis and fermentation processes. The process of to produce Uwi starch is to extract the pulp (grated) Uwi using water. The hydrolysis and fermentation processes are carried out simultaneously or *Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF)*. Uwi starch concentration 200 g/L, enzyme concentration (1.5% (w/w), yeast concentration 1.10% (w/w) and at a temperature of 30° C. The result of the *SSF* process is a low concentration of bioethanol, so that in order to increase the purity of bioethanol, using distillation. The distillation process uses 2-stage distillation, consisting of 2 columns, including the first without filling, equipped with a spiral cooling pipe, while the second column contains stuffing. The 2-stage distillation process each is operated at 78°C. The objective of this study was to

study the effect of SSF time on bioethanol concentration and to study the distillation time of stages 1 and 2 on the concentration of bioethanol. The best result of SSF process was achieved for 72 hours which resulted in a bioethanol concentration of 12.30%. The best results from the distillation stage 1 and stage 2 were achieved during each time of 90 minutes, namely the bioethanol concentration of 27.93% and 85.30%. The design of this 2-stage distillation apparatus is suitable for use as a means of abolishing the bioethanol produced by SSF.

Keywords : Uwi starch, SSF, two stage distillation, bioethanol.

PENDAHULUAN

Tanaman Uwi (*Discorea alata*) banyak tumbuh di Indonesia, terutama di lereng-lereng gunung, hutan sebagai tanaman liar. Tanaman ini menghasilkan umbi. Rakyat Indonesia jarang sekali mengkonsumsi umbi ini karena cara pengolahan umbi ini harus berhati-hati dan pencuciannya membutuhkan waktu yang lama. Pemanfaatan umbi ini dapat digunakan sebagai makanan alternatif terutamanya bagi orang yang sedang melakukan diet karena kandungan karbohidratnya tidak tinggi. Umbi tanaman ini dapat dikonversi juga menjadi bahan bakar alternatif, sebagai contoh bioetanol. Bioetanol merupakan salah satu bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar fosil yang dapat diperbarui dan lebih ramah lingkungan (Farrell *et al.*, 2006) dan (Karagoz *et al.*, 2012). Bioetanol mudah dibuat dari bermacam-macam bahan baku yang berasal dari produk pertanian (Jørgensen *et al.*, 2007), berbasis pati: singkong, umbi gadung, jagung, gandum, sagu (Favaro *et al.*, 2015) berbasis lignoselulose: jerami padi, eceng gondok (*water hyacinth*), *sugarcane bagasse*, *corn stalk*, *grass*, *pineapple peel* (Shaheen *et al.*, 2013), berbasis gula: gula tebu (*Saccharum officinarum*), gula bet (*Beta vulgaris*), molasses (Ensinas *et al.*, 2009)

Proses fermentasi dengan metode *Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF)* dari berbagai macam *feedstock* umumnya menghasilkan etanol kadar rendah. Penelitian *SSF* menggunakan yeast *S. carlsbergensis* menghasilkan etanol maksimum 15,9 g/L (2,21%) setelah 48 jam (Scordia *et al.*, 2010). Selanjutnya penelitiannya menggunakan design eksperimental untuk mengoptimalkan etanol melalui *SSF* dengan menggunakan selulase dan yeast *S. stipitis* menghasilkan etanol 18 g/L (2,5%) (Scordia *et al.*, 2010). Penelitian *SSF* terhadap *giant reed*,

menghasilkan konsentrasi etanol 39 g/L (5,41%) selama 72 jam (Silva *et al.*, 2015)

Proses pemisahan atau pemurnian digunakan untuk memurnikan crude etanol hasil fermentasi (Utama *et al.*, 2016). Pemurnian etanol hasil fermentasi dapat dilakukan menggunakan distilasi (Lei and Chen, 2003), adsorpsi (Fujita *et al.*, 2011) dan membran pervaporasi (Wei *et al.*, 2009). Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh waktu fermentasi (*SSF*) terhadap konsentrasi etanol pada konsentrasi pati umbi Uwi (*Discorea alata*) 200 g/L pada suhu 30°C dan mempelajari pengaruh waktu distilasi 2 tahap terhadap konsentrasi etanol.

METODOLOGI

Umbi Uwi (*Discorea alata*) berumur 10 bulan didapat dari desa Sukorejo, Kecamatan Gunung Pati, Semarang, Jawa Tengah-Indonesia, selanjutnya umbi ini dibuat pati yang merupakan bahan baku pembuatan bioetanol. Kandungan pati 32,64%. Pembuatan pati Uwi yaitu sebanyak 5 kg umbi Uwi yang dipeoleh dari petani dicuci terlebih dahulu menggunakan air agar bersih dan terpisah kotoran (tanah). Selanjutnya umbi ini dikuliti menggunakan pisau agar umbi terpisah dari kulitnya. Setelah diperoleh umbi maka umbi ini dicuci berkali-kali (biasanya 3 kali) menggunakan air yang mengalir sampai bersih. Untuk memperoleh pati yang maksimal umbi yang telah bersih ini diparut menggunakan alat parut tradisional sehingga umbi ini akan berubah bentuk menjadi bubur umbi Uwi. Bubur umbi ini selanjutnya diekstrak menggunakan air dengan cara diremas-remas agar diperoleh pati. Kondisi terakhir kalinya adalah campuran antara pati dan air. Selanjutnya campuran bahan ini dilakukan proses pemisahan menggunakan *centrifuge* pada kecepatan 100 rpm selama 20 menit. Pati umbi Uwi akan terpisah dari airnya, selanjutnya

dikeringkan menggunakan tray dryer pada suhu 60°C selama 15 jam (Hargono *et al.*, 2017)

Potassium sodium tartrate tetrahydrate dan 3,5-Dinitrosalicilyc acid (Merck), NaOH (98%, glukosa (99.5%, Merck) dan etanol (99.5%, Merck), $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dan yeast extract semuanya dibeli dari Sigma-Aldrich Indonesia. Enzim jenis GSHE sebagai Stargen™ 002 diperoleh dari Genencor International (USA) (Genencor, 2009) Enzim ini berisi *Aspergillus kawachii* α -amylase revealed di dalam *T. reesei* and glucoamylase dari *T. reesei*. Enzim α -amilase dan glucoamilase yang bekerja secara sinergi untuk menghidrolisis granula pati menjadi glukose. Aktivitas enzim 570 GAU/g dan pH 4-4,5. Mikroorganisme yang digunakan adalah *Saccharomyces cereviceae* yaitu Baker's yeast, produksi PT. Pakmaya didapat dari Toko Kabita, Semarang. Sebelum digunakan disimpan dalam almari pendingin. *Saccharomyces cereviceae* discatter dalam aquades pada suhu kamar pada konsentrasi 10 g/L.

Tahapan pra hidrolisis terlebih dulu dilakukan dengan tujuan yaitu memenuhi tahapan SSF. Hidrolisis pati Uwi dilakukan dalam erlenmeyer 250 mL. Konsentrasi pati umbi Uwi 200 g/L, konsentrasi enzim 1,5% (w/w), pH 4,5. Campuran di dalam erlenmeyer dipanaskan dalam *water bath* sampai suhu 50°C selama 30 jam pada kecepatan 100 rpm. Selanjutnya *slurry* didinginkan sampai suhu 30°C dan dilakukan inkubasi selama 18 jam. Selanjutnya *slurry* dipisahkan antara cake dan filtratnya menggunakan *centrifuge*. Filtrat yang ada dianalisis untuk menentukan jumlah glukosa yang dibebaskan. Fermentasi hidrolisis enzimatik dilakukan dengan menggunakan konsep SSF. Pra hidrolisis dilakukan untuk meningkatkan glukosa pada awal fermentasi sehingga hasil glukosa tersedia dan dapat difermentasi oleh yeast *Saccharomyces cereviceae* menjadi etanol konsentrasi rendah. Proses SSF ini dilakukan terhadap pati umbi Uwi pada konsentrasi 200 g/L dalam reaktor pada volume 1 L. Konsentrasi enzim 1,5% (w/w). Peralatan ini dilengkapi dengan kontrol pH. pH medium fermentasi dipertahankan 4,5 selama "cultivation" dikontrol secara hati-hati menggunakan 3 M NaOH. Selanjutnya pada media fermentasi ditambahkan beberapa nutrien:

$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 0.5 g L⁻¹, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.025 g L⁻¹ dan yeast extract 1.0 g L⁻¹ selama 15 jam dalam shaker-inkubator pada suhu 37°C dan 80 rpm. Selanjutnya pada medium fermentasi ini ditambahkan yeast kering 5 g/L dan dilakukan percobaan selama 90 jam. Sampel diambil secara periodik : 6, 12, 18 sampai 90 jam selanjutnya sampel ini dianalisis kandungan etanol dan glukosa menggunakan high performance liquid chromatography (HPLC) Aminex HPX-87H column.

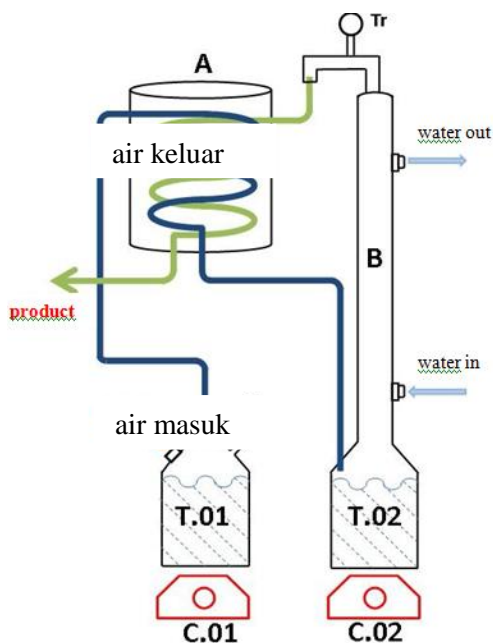
Hasil proses fermentasi adalah berupa *ethanol broth* yang mempunyai kandungan etanol yang rendah. Untuk meningkatkan kadar etanol dilakukan menggunakan distilasi 2 tahap seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Tahap satu *ethanol broth* dipanaskan dalam boiler T-01 pada suhu 78°C sehingga terbentuk uap campuran etanol-air. Campuran uap etanol-air yang berada di dalam pipa spiral (dalam Kondensor A) dikondensasi selama 15-120 menit menggunakan pendingin air. Setiap interval waktu 15 menit sampel hasil kondensasi dianalisis konsentrasi etanol menggunakan HPLC. Hasil etanol terbaik dari tahap1 digunakan sebagai umpan distilasi 2, dengan memanaskan sistem dalam boiler T-02 tersebut sampai suhu 78°C. Pemurnian tahap 2 dilakukan di dalam kolom kondensor (B) yang berisi bahan isian berupa packing selama periode waktu 6,12,18 sampai 78 jam. Hasil etanol keluaran dari kolom kondensor B merupakan hasil utama dari serangkaian proses distilasi tahap 2, selanjutnya konsentrasi etanol dianalisis menggunakan HPLC.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil SSF konsentrasi glukosa dan etanol pada konsentrasi pati Uwi 200 g/L, pada 30°C dan pH 4,5 dari periode waktu 6 sampai 78 jam ditunjukkan pada Tabel 1. Selama SSF dari 6 sampai 12 jam, konsentrasi glukosa yang menjadi 56,78 g/L, selanjutnya selama waktu 18 sampai 90 jam konsentrasi glukosa cenderung turun sampai 78 jam yaitu dari 48,90 g/L sampai 5,09 g/L, setelah 78 jam konsentrasi glukosa cenderung tetap pada 5,09 g/L. Kenaikan konsentrasi selama 6-12 jam disebabkan karena pada proses SSF ini memasuki tahap pre-hidrolisis (Silva *et al.*, 2015) yaitu aktivitas enzim selama hidrolisis pati Uwi yang menghasilkan konsentrasi glukosa mencapai

maksimum. Hal ini sebagai akibat proses SSF yang harus menyediakan glukosa untuk diubah menjadi etanol. Berbeda dengan glukosa, selama SSF konsentrasi etanol cenderung naik seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Selama SSF dari waktu 6 sampai 72 jam, konsentrasi etanol naik dari 40,18

g/L sampai 88,65 g/L. Selanjutnya selama waktu proses melebihi 78 jam konsentrasi etanol cenderung tetap yaitu 88,60 g/L. Hal ini terjadi karena ketersediaan glukosa dalam jumlah yang cukup untuk diproses secara fermentasi oleh yeast *Saccharomyces cerevisiae* menjadi etanol.



Gambar 1. A. Kondensor dengan pendingin air, B. Kolom distilasi berisi packing, C.01 pemanas -1 untuk Boiler-1, C.02 pemanas-2 untuk Boiler-2, T-01 Boiler-1, T-02 Boiler-2, dan Tr Termometer.

Tabel 1. Pengaruh waktu fermentasi (SSF) terhadap konsentrasi glukosa dan konsentrasi etanol pada Konsentrasi pati Uwi 200 g/L, 30°C dan pH 4

Waktu, jam	C _{glukosa} , g/L	C _{etanol} , g/L	C _{etanol} , (%)
0	0	0	0
6	32,24	40,18	5,58
12	56,78	49,29	6,84
18	48,90	57,84	8,03
24	18,59	65,82	9,14
30	13,02	71,62	9,94
36	12,51	73,75	10,24
42	11,29	75,46	10,48
48	8,94	77,86	10,81
54	8,48	82,25	11,42
60	5,46	84,12	11,68
66	5,23	86,54	12,01
72	5,11	88,65	12,30
78	5,09	88,62	12,31
84	5,09	88,60	12,30
90	5,09	88,60	12,30

Penambahan ragi pada proses fermentasi SSF selama 12 jam menghasilkan konsentrasi glukosa 28 g/L (Silva *et al.* 2015). Hasil glukosa ini digunakan untuk fermentasi SSF selama 78 jam menghasilkan konsentrasi etanol 39 g/L. Hargono *et al.*, (2015) melakukan penelitian SSF pati singkong pada konsentrasi 200 g/L, menggunakan Stargen™ 002 (0,1% w/w) dan yeast *Saccharomyces cerevisiae* menghasilkan konsentrasi etanol 36,16 g/L. Kusmiyati, *et al.*, (2016) melakukan studi hidrolisis tepung Iles-iles (*Amorphophalus campanulatus*) pada konsentrasi 10% untuk memproduksi gula reduksi yang akan digunakan sebagai bahan baku fermentasi menggunakan *Zymomonas mobilis*. Kondisi optimum dicapai pada pH 4,5, 30°C selama 120 jam, menghasilkan etanol 10.33 % (v/v).

Pengaruh Waktu Distilasi terhadap Konsentrasi Etanol

Proses pemurnian etanol melalui distilasi tahap-1 dilakukan terhadap *ethanol broth* hasil fermentasi SSF terbaik yaitu 88,65 g/L atau 12,30% (waktu 72 jam). Selanjutnya setelah dilakukan pemurnian menggunakan distilasi tahap-1 hasil etanol yang didapat seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Selama waktu distilasi 15-105 menit terjadi kenaikan konsentrasi etanol dari 11,06% sampai 27,92%, selanjutnya setelah proses distilasi dilanjutkan sampai waktu 105 menit konsentrasi etanol hampir tetap, yaitu 27,93%. Proses distilasi tahap 1 terjadi kondensasi di dalam kolom A tanpa menggunakan bahan isian sehingga kenaikan konsentrasi etanol hanya sampai 27,93%. Hal ini diasumsikan bahwa proses distilasi ini hanya terdiri 1 stage sehingga konsentrasi etanol hanya terbatas pada 27,93%, walaupun waktu distilasi dinaikkan sampai 105 jam, hasil konsentrasi etanol cenderung tetap, seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Distilasi tahap 2 merupakan cara yang digunakan untuk meningkatkan konsentrasi etanol dari hasil distilasi tahap 1 (27,93%). Selama waktu 90 menit distilasi ini menghasilkan konsentrasi etanol 85,30% seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 2. Pengaruh Waktu Distilasi Tahap 1 terhadap Konsentrasi Etanol

Waktu (menit)	Konsentrasi etanol (g/L %)
0	11,06
15	12,94
30	16,06
45	18,27
60	19,55
75	24,16
90	27,92
105	27,93

Tabel 3. Pengaruh Waktu Distilasi Tahap 2 terhadap Konsentrasi Etanol

Waktu (menit)	Konsentrasi etanol (%)
0	30,72
60	74,68
75	83,25
90	85,30
105	81,64
120	81,63

Distilasi ini merupakan metode untuk memisahkan campuran biner etanol-air. Menurut Huang *et al.*, (2008) metode distilasi pemisahan campuran biner etanol-air hanya dapat menghasilkan konsentrasi etanol maksimum 95,63% (w/w) karena terbatas pada titik azeotrop. Vane *et al.*, (2012) melakukan studi pemisahan etanol hasil fermentasi *ethanol broth* pada konsentrasi 5% pada flowrate 145 g/menit menggunakan distilasi terintegrasi dengan membran dihasilkan konsentrasi etanol 63,5 sampai 98,5%

KESIMPULAN

Proses SSF terhadap pati umbi Uwi pada konsentrasi 200 g/L selama 72 jam menghasilkan glukosa 5,11 g/L, sedangkan konsentrasi ethanol broth 12,30%. Pada tahap pemurnian terhadap ethanol broth menggunakan distilasi tahap 1 dan tahap 2 diperoleh masing-masing konsentrasi etanol 27,92% dan 85,30% selama 90 menit Rancangan peralatan distilasi 2 tahap ini layak digunakan untuk pemurnian hasil fermentasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ensinas, A.V., Modesto, M., Nebra, S.A. & Serra, L., 2009. Reduction of irreversibility generation in sugar and ethanol production from sugarcane. *Energy*, 34(5):680-688.
- Farrell, A.E., Plevin, R.J., Turner, B.T., Jones A.D., O'Hare, M., & Kammen, D.M., 2006. Ethanol can contribute to energy and environmental goals. *Science*. 311:506–508.
- Favaro, L, Viktor, M.J., Rose, S.H., Viljoen-Bloom, M., van Zyl W.H., Basaglia, M., Cagnin, L., & Casella, S., 2015. Consolidated bioprocessing of starchy substrates into ethanol by industrial *Saccharomyces cerevisiae* strains secreting fungal amylases. *Biotechnology Bioengineering*, 112:1751–60.
- Fujita, H., Qian, Q., Fujii, T., Mochizuki, K. & Sakoda 2011. Isolation of ethanol from its aqueous solution by liquid phase adsorption and gas phase desorption using molecular sieving carbon. *Adsorption* 17: 869–879.
- Genencor STARGEN™ 002 2009 are trademarks of Danisco US Inc. in the United States
- Hargono, H., Jos, B., & Kumoro, A.C. 2017 Kinetics of the Enzymatic Hydrolysis of Sweet Cassava Starch and Bitter Cassava Flour and Gadung (*Dioscorea hispida* Dennst) Flour at Low Temperature. *Bull. Chem. React. Eng. Catal.* 12(2):256–262.
- Hargono, H., Kumoro, A.C., & Jos, B. 2015 Comparative study on the conventional and non thermal simultaneous saccharification and fermentation of *Manihot glaziovii* root starch. *AIP Conference Proceedings* 1699:030013
- Huang, H.J., Ramaswamy, S., Tschirner U.W. & Ramarao, B.V. 2008. A review of separation technologies in current and future biorefineries. *Sep Purif Technol.* 62(1):1-21.
- Jørgensen, H., Kristensen, J.B. & Felby, C. 2007. Enzymatic conversion of lignocellulose into fermentable sugars: challenges and opportunities. *Biofuel Bioprod. Bior.* 1:119–134.
- Karagöz, P., Rocha, I.V., M.Ö. & Angelidaki, I 2012. *Bioresource Technology*. 104:349-357
- Kusmiyati, Hadiyanto, H. & Kusumadewi, I. 2016. Bioethanol Production From Iles-Iles (*Amorphopallus Campanulatus*) Flour by Fermentation Using *Zymomonas Mobilis* *International Journal of Renewable Energy Development*, 9(1):9-14.
- Lei, Z., Li, C. & Chen, B. 2003 Extractive Distillation: A Review. *Separation & Purification Reviews*. 32:121–213
- Scordia, D., Cosentino, S.L., & Jeffries, T.W. 2010. Perennial grasses as lignocellulosic feedstock for second-generation bioethanol production in Mediterranean environment. *Bioresource Technology*. 101(14):5358–65
- Scordia, D., Cosentino, S.L., Lee, J.W., & Jeffries, T.W. 2012 Bioconversion of giant reed (*Arundo donax* L.) hemicellulose hydrolysate to ethanol by *Scheffersomyces stipitis* CBS6054. *Biomass Bioenergy*. 39:296-305.
- Shaheen, S.M., Rinklebe, J., Frohne, T., White, J.R., & Delaune, R.D. 2013 Biogeochemical Factors Governing Co, Ni, Se, and V Dynamics in Periodically Flooded Egyptian North Nile Delta Rice Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 78(3):1065-1078.
- Silva, C.F.L.E., Schirmer, M.A., Maeda, R.N., Barcelos, C.A., Pereira, N. 2015. Potential of giant reed (*arundo donax* L.) for second generation ethanol production. *Electron. Journal Biotechnology* 18:10–15.
- Utama, G. L., Kurnani, T.B.A., & Balia, R.L., 2016. Selection of Mozzarella Cheese Whey Native Yeasts with Ethanol and Glucose Tolerance Ability. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*. 6:252-257.
- Vane, L.M., Alvarez, F.R., Rosenblum, L., & Govindaswamy, S. 2013. Efficient Ethanol Recovery from Yeast Fermentation Broth with Integrated Distillation–Membrane Process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 52(3):1033-1041.
- Wei, X.Z., Liu, X.F., Zhu, B.K. & Xu, Y.Y. 2009. Membranes of crosslinked hyperbranch polymers and their pervaporation properties. *Desalination*, 247(1-3): 647-656.