

PENGARUH VOLUME FILTRAT GLUKOSA DAN *TURBO YEAST* PADA PEMBUATAN BIOETANOL DARI LIMBAH CAIR TEPUNG TERIGU

Yustica Chandra Kania, Fernanda Andika Arya Revandana*, Ni Ketut Sari

Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik

Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur

Universitas Pendidikan Nasional Veteran Jawa Timur
Jalan Raya Rungkut Madya Gunung Anyar, Surabaya, Indonesia, 60249

*Email:19031010212@student.upnjatim.ac.id

Abstrak

Abstrak
Kandungan pati yang cukup tinggi dalam limbah cair tepung terigu berpotensi dapat dimanfaatkan menjadi produk bioetanol. Produksi bioetanol yang dilakukan pada penelitian ini berbasis fermentasi anaerob selama 5 hari menggunakan Turbo Yeast dikembangkan untuk mengolah limbah cair industri tepung terigu menjadi bioetanol. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh volume filtrat glukosa hasil hidrolisis limbah cair tepung terigu dan rasio Turbo Yeast terhadap volume filtrat glukosa pada pembuatan bioetanol. Penelitian dijalankan dengan variasi volume filtrat glukosa hasil hidrolisis 50mL, 100mL, 150mL, 200mL, dan 250 mL serta rasio Turbo Yeast terhadap volume filtrat glukosa 1:20, 1:40, 1:60, 1:80, dan 1:100. Parameter keberhasilan penelitian dinilai melalui kadar bioetanol yang dihasilkan masing-masing sampel pada proses fermentasi. Kadar bioetanol tertinggi didapatkan sebesar 41% pada variasi volume filtrat 200 mL dan rasio Turbo Yeast terhadap volume filtrat 1:20. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin banyak Turbo Yeast yang digunakan maka kadar bioetanol yang dihasilkan semakin besar sementara kadar bioetanol akan menurun seiring dengan meningkatnya volume filtrat glukosa hasil hidrolisis.

Kata kunci: fermentasi, hidrolisis, limbah cair tepung terigu, regresi, Turbo Yeast

1. PENDAHULUAN

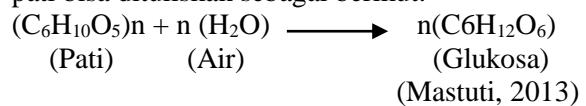
Salah satu energi hijau terbarukan yang sedang diupayakan penggunaanya untuk mengurangi dampak negatif penggunaan bahan bakar fosil di seluruh dunia adalah bioetanol. Bioetanol merupakan bahan bakar nabati yang diproduksi dari biomassa yang mengandung glukosa seperti sukrosa, pati, dan lignoselulosa. Bioetanol dipilih sebagai energi hijau karena menawarkan berbagai manfaat seperti kemudahan dalam produksinya yang ditunjang berlimpahnya ketersediaan bahan baku (Manmai dkk., 2020).

Tanaman energi yang mengandung linoselulosa seperti tebu, jagung, dan jarak pagar telah digunakan sebagai bahan produksi bioethanol. Peningkatan permintaan bioetanol dunia yang tinggi memberikan dampak yang sangat besar pada kapasitas produksi tanaman energi yang mengakibatkan harga bahan baku pembuatan bioethanol semakin meningkat. Hal ini mendorong sejumlah peneliti untuk menghasilkan bioetanol dari bahan baku lainnya yang lebih ekonomis. Sumber bahan baku bioethanol baru terbarukan tersebut misalnya seperti limbah cair industri makanan dan minuman (Comelli dkk., 2016)

Kandungan glukosa yang tinggi pada limbah cair industri tepung terigu dapat menjadi

alternatif yang ramah lingkungan dan ekonomis jika dibandingkan dengan produksi bioetanol dari tanaman energi. Limbah cair tepung terigu merupakan limbah hasil pengolahan biji gandum pada proses pengolahan tepung terigu. Sebuah studi melaporkan bahwa pada 1 liter limbah cair tepung gandum mengandung 18.9 ± 2.5 gram pati, 13.0 ± 5.1 serat, dan 3.8 ± 0.1 protein. Di sisi lain, limbah cair tepung terigu yang mengandung pati bersifat tidak beracun bagi kebanyakan mikroba. Berbagai mikroba dapat langsung memanfaatkan kandungan organik pada limbah cair tepung terigu secara biokimia (Luo dkk., 2018).

Tahap awal sebelum menjalani proses fermentasi, pati harus dipecah dengan salah satu cara yaitu hidrolisis. Hidrolisis adalah suatu proses antara reaktan dengan air agar suatu senyawa pecah atau terurai. Reaksi hidrolisis pati bisa dituliskan sebagai berikut:



Hidrolisis asam menggunakan asam sebagai katalisnya, biasanya yang dipakai adalah asam kuat. Asam yang umum digunakan dalam hidrolisis adalah HCl atau H_2SO_4 pada rentang

konsentrasi 2-5% (Roosdiana, 2014). Proses hidrolisa menggunakan katalisator asam sulfat memberikan perolehan kadar furfural yang lebih besar daripada penggunaan katalisator asam klorida. Hal ini dapat terjadi karena asam sulfat memiliki jumlah ion H^+ yang lebih banyak daripada asam klorida sehingga pemutusan ikatan menjadi monomer-monomer berlangsung lebih baik. Kecepatan reaksi hidrolisa dipengaruhi oleh keberadaan ion H^+ dalam larutan, sehingga semakin besar jumlah ion H^+ maka kecepatan reaksi semakin meningkat dan memberikan produk hasil hidrolisa yang semakin besar (Mardina dkk., 2016)

Fermentasi merupakan proses konversi kimia sederhana dari senyawa bioorganik menjadi produk yang lebih sederhana dengan bantuan bakteri, yeast atau jamur pada kondisi tanpa oksigen atau anaerobic (Choudhary dkk., 2018). Munculnya gelembung udara saat fermentasi menunjukkan adanya katabolisme anaerob dari gula yang ada dalam ekstrak (Stanbury dkk., 2017)

Prinsip fermentasi didasarkan pada kinetika pertumbuhan dan adaptasi mikroba pada substrat. Mikroba mulai memproduksi metabolit primer untuk pertumbuhan maksimal pada fase log setelah menyerap nutrisi pada media. Metabolit primer selanjutnya berperan untuk produksi metabolit skunder mikroba pada fase stasioner. Selanjutnya produk akhir dari metabolisme dapat dioksidasi lebih lanjut dengan mengembangkan dua molekul ATP oleh yeast.

Fermentasi yang menghasilkan etanol umumnya menggunakan yeast *S.cerevisiae*. Penggunaan khamir *S.cerevisiae* dalam proses fermentasi tidak terlepas dari kelebihannya yaitu dapat memfermentasi glukosa dengan cepat dalam kondisi oksigen terbatas. Khamir jenis ini telah lama diaplikasikan pada banyak berbagai industry seperti dalam industry bir, roti, wine dan produksi industry etanol karena mudah didapat, cepat berkembang biak, tahan terhadap temperature tinggi, bersifat stabil, dan cepat beradaptasi *S.cerevisiae* dapat tumbuh baik pada temperature 30°C dan pH 4,8 (Choudhary dkk., 2018).

(Bachtiar dkk., 2021) dalam penelitiannya melaporkan bahwa kadar bioetanol terbaik yang dihasilkan dari proses fermentasi limbah cair tepung menggunakan *Alcotec 48 Turbo Yeast* yaitu sebesar 37%. Kadar bioetanol terbaik diperoleh pada kondisi kadar *Turbo Yeast* 10 %

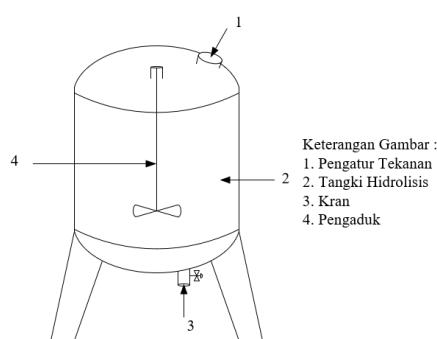
dengan waktu fermentasi selama 5 hari. Konsentrasi filtrat glukosa hasil hidrolisis limbah cair tepung yang digunakan yaitu sebesar 11 % dan pH filtrat sebesar $\pm 4,5$ pada temperatur 25°C. Menurut (Arifiyanti dkk., 2020) penggunaan *S.cerevisiae* (*Turbo Yeast 48*) dapat menghasilkan etanol dengan kadar yang cukup tinggi. Pada penelitian tersebut menggunakan bahan biji nangka dengan tahapan proses hidrolisis dengan enzim α -amylase dan glukoamilase dan fermentasi menggunakan yeast *S.cerevisiae* (*Alcotec Turbo Yeast 48*) dengan variasi waktu fermentasi. Hasil akhir yang didapatkan adalah kadar etanol tertinggi sebesar 40% dengan waktu fermentasi 60 jam.

Studi penelitian produksi bioetanol berbasis fermentasi anaerob selama 5 hari menggunakan *Turbo Yeast* dikembangkan untuk mengolah limbah cair industri tepung terigu menjadi bioetanol. Penelitian dilakukan dengan variasi parameter uji volume filtrat glukosa hasil hidrolisis limbah cair tepung terigu dan rasio *Turbo Yeast* terhadap volume filtrat glukosa. Temuan penelitian ini memungkinkan menjadi sebuah solusi khususnya bagi industri tepung terigu seperti PT. Indofood Sukses Makmur terhadap permasalahan pengelolaan limbah cair tepung terigu yang berpotensi menjadi bioetanol.

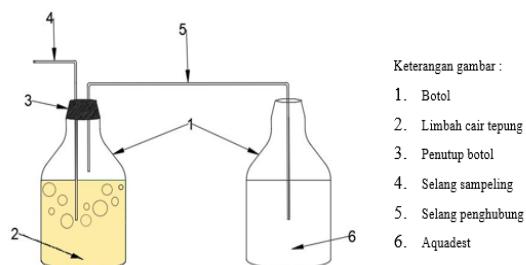
2. METODOLOGI

2.1 Bahan dan Alat

Bahan utama yang digunakan pada penelitian ini yaitu limbah cair tepung yang diperoleh dari industri tepung terigu, Asam Sulfat (H_2SO_4), Aquadest, Natrium Hidroksida ($NaOH$), *Alcotec 48 Turbo Yeast*, NPK dan Urea. Peralatan utama yang digunakan dalam penelitian ini yaitu diantaranya serangkaian alat hidrolisis, fermentor sederhana skala laboratorium, pH meter, oven, refractometer glukosa dan refractometer alkohol. Alat hidrolisis yang digunakan terdiri atas tangki hidrolisis dan pengaduk ditunjukkan pada **Gambar 1**, sementara fermentor skala laboratorium terdiri dari botol kaca, tutup botol, plastisin, dan selang tidak berwarna berdiameter kecil ditunjukkan **Gambar 2**.



Gambar 1. Rangkaian Alat Hidrolisis



Gambar 2. Rangkaian Alat Fermentasi

2.2 Prosedur

Prosedur pembuatan bioetanol dari limbah cair tepung terigu dilakukan melalui dua tahap, yaitu proses hidrolisis dan fermentasi.

2.2.1 Tahap Hidrolisis

Proses hidrolisis diawali dengan proses preparasi limbah cair tepung terigu. Preparasi dilakukan dengan menyaring limbah cair dengan kain kasa sebanyak 5 kali. Kemudian sebanyak 4 liter limbah cair tepung yang telah bebas dari impurities dimasukkan ke dalam tangki hidrolisis. Limbah cair tepung dihidrolisis dengan larutan H_2SO_4 5% (% v/v) selama 60 menit pada suhu $\pm 30^\circ C$ kemudian diaduk. Setelah dingin, hasil hidrolisis disaring untuk diambil filtrat glukosanya yang akan digunakan untuk proses fermentasi. Filtrat glukosa kemudian dianalisa kadar glukosanya dengan menggunakan refractometer glukosa (Bachtiar dkk., 2021).

2.2.2 Tahap Fermentasi

Filtrat glukosa hasil hidrolisis disaring terlebih dahulu untuk dipisahkan dari impuritiesnya. Penetapan pH sebesar 4,5 dilakukan dengan menambahkan NaOH 8N apabila filtrat bersifat asam atau menambahkan H_2SO_4 98% apabila filtrat bersifat basa. Sterilisasi fermentor menggunakan oven. Kemudian masukkan filtrat glukosa hasil hidrolisis pada masing-masing fermentor yang telah disterilisasi sebanyak volume filtrat (VF)

yang divariasikan yaitu 50 mL, 100 mL, 150 mL, 200 mL, dan 250 mL. Masukkan Alcotec 48 *Turbo Yeast* (TY) ke dalam filtrat glukosa hasil hidrolisis dengan rasio (%w/v) 1:20, 1:40, 1:60, 1:80, 1:100 untuk tiap-tiap variasi volume filtrat glukosa hasil hidrolisis. Tambahkan NPK dan urea masing-masing sebanyak 0,1 gr/100 mL. Tutup fermentor dengan plastisin hingga rapat. Isi botol fermentor yang lainnya dengan air secukupnya. Kemudian sambungkan kedua botol dengan selang yang berfungsi sebagai indikator adanya CO_2 (Bachtiar dkk., 2021).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisa Kandungan Limbah Cair Tepung Terigu

Limbah cair yang dihasilkan dari proses produksi tepung terigu mengandung beragam bahan organik yang dapat diolah kembali menjadi produk bermilai guna. Keberadaan bahan organik dalam limbah cair tepung terigu salah satunya dapat direpresentasikan dengan besarnya kosentrasi glukosa dalam air limbah.

Kegiatan awal penelitian meliputi analisis kadar glukosa limbah cair tepung terigu sebelum dan sesudah dilakukan preteratment hidrolisis asam dengan menggunakan alat refraktometer brix. Pengukuran kadar glukosa pada limbah cair tepung terigu bertujuan untuk mengetahui keberhasilan proses pretreatment hidrolisis asam yang dilakukan. Pretreatment hidrolisis asam dilakukan pada suhu ruangan beserta pengukuran kadar glukosa (Bachtiar dkk., 2021). Adapun hasil pengukuran kandungan glukosa sebelum dan sesudah dilakukan pretreatment hidrolisis asam disajikan dalam **Tabel 1**.

Tabel 1. Analisis Kandungan Glukosa Limbah Cair Tepung Terigu

Kondisi	Hasil (%)
Sebelum hidrolisis	3
Sesudah hidrolisis	15

Berdasarkan **Tabel 1** di atas, proses preteratment hidrolisis asam yang dilakukan pada limbah cair tepung terigu telah berhasil. Hal ini ditandai dengan meningkatnya kosentrasi glukosa yang terkandung pada limbah cair tepung terigu. Menurut penelitian (Ariyanto dkk., 2013), kandungan minimal kadar glukosa yang dapat digunakan untuk fermentasi agar menghasilkan etanol yaitu sebesar 14%.

Apabila kandungan glukosa kurang dari 14% maka perlu dilakukan adanya penambahan gula. Penambahan gula tersebut sangat membantu pada saat proses pengubahan glukosa menjadi etanol (fermentasi). (Nwoye dkk., 2015) melaporkan bahwa konsentrasi minimal glukosa yang dapat memproduksi bioethanol paling maksimal yaitu 15%, dimana pada konsentrasi tersebut mikroba akan tumbuh dan mengkonversi substrat menjadi etanol tanpa menyebabkan metabolisme sel menurun. Apabila konsentrasi glukosa semakin tinggi maka akan meningkatkan tekanan osmotic yang dapat mengganggu metabolisme sel dan efisiensi proses fermentasi. Dengan demikian, limbah cair tepung terigu yang telah dihidrolisis diberikan perlakuan penambahan gula hingga konsentrasi 15% sebelum dilakukan proses fermentasi.

3.2 Analisis Kandungan Bioetanol Proses Fermentasi

Proses fermentasi bertujuan untuk mengkonversi kandungan glukosa pada limbah cair tepung terigu menjadi bioethanol dengan bantuan *Turbo Yeast*. Proses fermentasi berlangsung dalam kondisi anaerob (tanpa keberadaan oksigen). Waktu fermentasi, jenis yeast, dan pH filtrat hasil hidrolisis digunakan sebagai variabel tetap. Sementara variabel peubah yang digunakan yaitu volume filtrat hasil hidrolisis beserta rasio *Turbo Yeast* terhadap volume filtrat. Pengujian kadar bioethanol dilakukan dengan menggunakan alat refraktometer alkohol dan hasil analisis kadar bioethanol pada sampel yang diuji dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Analisis Kadar Bioetanol Pada Proses Fermentasi

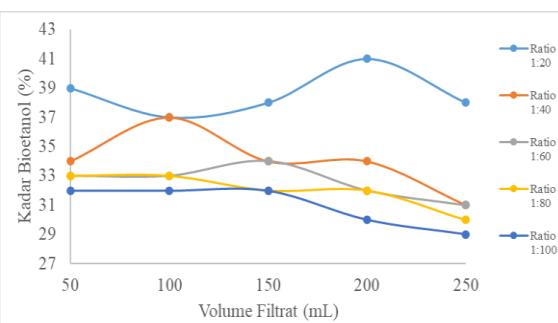
Volume Filtrat (mL)	Kadar Bioetanol (%)					
	Rasio <i>Turbo Yeast</i> terhadap Volume Filtrat (gr/mL)	1:20	1:40	1:60	1:80	1:100
50	39	34	33	33	32	
100	37	37	33	33	32	
150	38	34	33	32	32	
200	41	34	32	32	30	
250	38	31	31	30	29	

Hasil analisa kadar bioethanol pada **Tabel 2** menunjukkan bahwa kadar bioethanol tertinggi didapatkan pada parameter uji volume filtrat 200 mL dan rasio *Turbo Yeast* terhadap

volume filtrat 1:20. Rasio *Turbo Yeast* terhadap volume filtrat yang dimaksud adalah 200 mL filtrat hasil hidrolisis dengan berat *Turbo Yeast* 10 gr. Adapun kadar bioetanol yang didapatkan yakni sebesar 41 %. Menurut (Zaldivar zzz., 2001) pada umumnya bioetanol yang dihasilkan melalui proses fermentasi glukosa menggunakan bantuan mikroba *S.cerevisiae* menghasilkan kadar tidak lebih dari 21% sementara bioetanol yang dihasilkan dengan proses fermentasi menggunakan *Z.mobilis* hanya menghasilkan bioethanol dengan kadar 12%.

Penelitian pembuatan bioethanol dari limbah cair tepung menggunakan *Turbo Yeast* sebelumnya juga telah dilakukan oleh (Bachtiar dkk., 2021) Hasil penelitian menunjukkan bahwa didapatkan kadar bioethanol tertinggi sebesar 37%. Tingginya kadar bioetanol yang dihasilkan dari proses fermentasi disebabkan karena penggunaan *Turbo Yeast*. *Turbo Yeast* diketahui mengandung ragi *Alcotec Ethanol TT* yang sangat aktif bercampur dengan Nutrient *Alcotec* untuk fermentasi alkohol tinggi sehingga dapat menghasilkan kadar etanol yang lebih tinggi dari penggunaan *S.cerevisiae* (Khurniawati dkk., 2019)

3.3 Pengaruh Volume Filtrat Hasil Hidrolisis terhadap Kadar Bioetanol

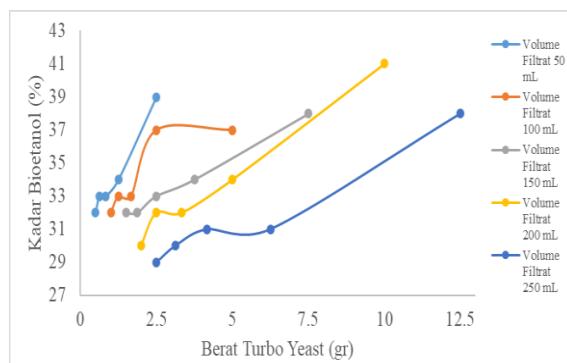


Gambar 2. Hubungan Antara Volume Filtrat (mL) dengan Kadar Bioetanol Hasil Fermentasi

Salah satu faktor yang dapat mempengaruhi kadar etanol hasil fermentasi adalah volume filtrat hidrolisis. Filtrat hidrolisis merupakan substrat yang digunakan pada proses fermentasi. Kandungan glukosa dalam filtrat hasil hidrolisis berperan sebagai sumber karbon *Turbo Yeast* untuk dikonversi menjadi bioethanol. Pengaruh volume filtrat hidrolisis terhadap kadar bioetanol hasil fermentasi dapat dilihat pada **Gambar 2**. Berdasarkan **Gambar**

2 diketahui bahwa kadar bioethanol yang dihasilkan mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya volume filtrat hasil hidrolisis. Meningkatnya volume filtrat hidrolisis mengakibatkan konsentrasi glukosa meningkat. Menurut (Amadi and Ifeanacho, 2016) melaporkan bahwa peningkatan konsentrasi glukosa pada substrat akan menurunkan pemanfaatan glukosa oleh mikroba yang mengakibatkan penurunan total pada produksi kadar etanol. (Zabed dkk., 2014) melaporkan bahwa peingkatan konsentrasi gula terlalu tinggi menyebabkan penyerapan sel mikroba melebihi kapasitas sehingga mengakibatkan proses konversi glukosa menjadi terganggu.

3.4 Pengaruh Rasio *Turbo Yeast* terhadap Kadar Bioetanol



Gambar 3. Hubungan Antara Kadar Bioetanol Hasil Fermentasi Dengan Rasio *Turbo Yeast*

Faktor lain yang mempengaruhi kadar bioethanol hasil fermentasi adalah rasio Volume Filtrat terhadap *Turbo Yeast*. Rasio volume filtrat terhadap *Turbo Yeast* adalah variasi berat *Turbo Yeast* yang ditambahkan pada tiap volume filtrat. Pengaruh *Turbo Yeast* terhadap kadar bioetanol hasil fermentasi dapat dilihat pada **Gambar 3**. Berdasarkan **Gambar 3** bahwa semakin banyak *Turbo Yeast* yang digunakan maka kadar bioetanol yang dihasilkan semakin besar. Hasil ini sejalan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh (Suhendrayatna dkk., 2017) yang menjelaskan bahwa semakin banyak *yeast* yang digunakan pada proses fermentasi maka produksi etanol yang dihasilkan akan semakin banyak. Hal ini disebabkan semakin banyak *yeast* yang digunakan, maka glukosa yang terurai oleh mikroorganisme menjadi etanol akan semakin

banyak sehingga etanol yang dihasilkan akan semakin besar.

4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa pengaruh rasio *Turbo Yeast* terhadap kadar bioetanol yang dihasilkan adalah semakin banyak *Turbo Yeast* yang digunakan maka kadar bioetanol yang dihasilkan semakin besar dan pengaruh volume filtrat hidrolisis terhadap kadar bioethanol yang dihasilkan adalah mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya volume filtrat hasil hidrolisis. Kadar bioetanol tertinggi didapatkan sebesar 41% pada variasi volume filtrat 200 mL dan rasio *Turbo Yeast* terhadap volume filtrat 1:20.

DAFTAR PUSTAKA

- Amadi, P.U., Ifeanacho, M.O. (2016). Impact of changes in fermentation time, volume of yeast, and mass of plantain pseudo-stem substrate on the simultaneous saccharification and fermentation potentials of African land snail digestive juice and yeast. *J. Genet. Eng. Biotechnol*, 14, pp. 289–297.
- Ariyanto, H., Hidayatullah, F., Murwono, J. (2013). Pengaruh penambahan gula terhadap produktivitas alkohol dalam pembuatan wine berbahan apel buang (reject) dengan menggunakan nirkor mz.11. *J. Teknol. Kim. Dan Ind*, 2, pp. 226–232.
- Bachtiar, S., Wahyuningtyas, R., Sari, N.K. (2021). Bioetanol Dari Limbah Cair Tepung Terigu Dengan Proses fermentasi Menggunakan *Turbo Yeast*. *J. Tek. Kim*, 16, pp. 29–34.
- Choudhary, dkk. (2018). *Principles and Applications of Fermentation Technology*, 1st Ed., Wiley Scrivener Publishing, Beverly
- Comelli, R.N., Seluy, L.G., Isla, M.A. (2016). Optimization of a low-cost defined medium for alcoholic fermentation - a case study for potential application in bioethanol production from industrial wastewaters. *N. Biotechnol*, 33, pp. 107–115.
- Khurniawati, K., Fathoni, M.U., Sari, N.K. (2019). Pembuatan Bioetanol Berbasis Glukosa Off Grade Dengan Proses Fermentasi Menggunakan Fermiol. *J. Tek. Kim*, 13, pp. 48–52.

- Luo, W., Zhao, Z., Pan, H., Zhao, L., Xu, C., Yu, X. (2018). Feasibility of butanol production from wheat starch wastewater by *Clostridium acetobutylicum*. *Energy* 154, pp. 240–248.
- Manmai, N., Unpaprom, Y., Ponnusamy, V.K., Ramaraj, R. (2020). Bioethanol production from the comparison between optimization of sorghum stalk and sugarcane leaf for sugar production by chemical pretreatment and enzymatic degradation. *Fuel*, 278, pp. 1–14.
- Mardina, Prathama, H.A., Hayati, D.M. (2016). Pengaruh Waktu Hidrolisis Dan Konsentrasi Katalisator Asam Sulfat Terhadap Sintesis Furfural Dari Jerami Padi. *Konversi* 3, 1.
- Nwoye, C.I., Agu, P.C., Chukwudi, B.C., Nwakpa, S.O., Ijomah, I.A., Idenyi, N.E. (2015). Assessment Evaluation of Bio-Ethanol Yield for Energizing Prosthetics Production Plant Based on Bacterial Growth and Shaking Rate. *Biomed. Sci. Eng*, 3, pp. 15–22.
- Stanbury, P.F., Whitaker, A. dan Hall, S. J. (2017). Principles of fermentation technology. 3rd Edition. In (Vol. 4, Issue 1).
- Suhendrayatna, Mahmudah, J., Hayani, L., Rcl, N. (2017). Pengaruh Rasio Pelarut dan Berat Yeast pada Proses Fermentasi Pati Keladi (*Colocasia esculenta*) menjadi Etanol 1, 88–92.
- Zabed, H., Faruq, G., Sahu, J.N., Azirun, M.S., Hashim, R., Nasrulhaq Boyce, A. (2014). Bioethanol production from fermentable sugar juice. *Sci. World J*, 2014, pp. 1–11.
- Zaldivar, J., Nielsen, J., Olsson, L. (2001). Fuel ethanol production from lignocellulose: A challenge for metabolic engineering and process integration. *Appl. Microbiol. Biotechnol*, 56, pp. 17–34.