

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Adapun penelitian terdahulu tentang rancang bangun dan pengaruh susunan pisau setengah helix pada mesin pencacah limbah sayur yang dilakukan oleh Nurcahya Nugraha dan Tunggul Pramana (2023). Mesin pencacah limbah sayuran ini dirancang menggunakan poros horizontal yang ditenagai oleh motor listrik AC berdaya 1 hp. Digunakan mekanisme *pulley* dan *belt* untuk mereduksi putaran dan mentransmisikan daya dari motor ke pisau pencacah. Pada mesin pencacah ini, digunakan susunan pisau setengah heliks dan susunan sejajar. Pada mesin ini, dilakukan pengujian untuk mengetahui keunggulan dalam memilih pola susunan pisau setengah heliks dibandingkan dengan pola susunan pisau sejajar. Dalam penelitian ini, eksperimen dilakukan dengan menggunakan kecepatan putaran sebesar 1800 rpm. Mesin pencacah dengan susunan pisau setengah heliks memiliki kapasitas pencacahan sebesar 231,4 kg/jam; lebih tinggi dibandingkan dengan susunan pisau sejajar yang mampu mencacah sebanyak 89 kg/jam. Itulah sebabnya kapasitas pencacahan susunan pisau setengah helix lebih besar daripada kapasitas pencacahan susunan pisau sejajar.

Dalam mesin pencacah dengan pisau setengah helix, limbah sayuran dihantarkan dengan lebih cepat ke saluran output dibandingkan dengan pisau sejajar. Kapasitas pencacahan susunan pisau setengah heliks lebih besar daripada kapasitas pencacahan susunan pisau sejajar. Susunan pisau setengah helix memiliki persentase massa sisa cacahan yang lebih rendah dibandingkan dengan susunan pisau sejajar. Hal ini menunjukkan mesin dengan susunan pisau helix lebih efisien daripada mesin dengan susunan pisau sejajar.

Rancang bangun mesin pencacah batang pisang multifungsi yang dilakukan oleh Jufri dkk. (2024), tujuan penelitian ini ialah merancang dan membangun mesin pencacah batang pisang multifungsi. Hal ini bertujuan untuk mempermudah peternak sapi dalam mencacah batang pisang dan mengolah limbah pertanian menjadi pakan ternak alternatif. Metode penelitian ini dilakukan secara eksperimental, dengan merancang dan membangun mesin pencacah batang pisang

multifungsi. Pengujian kapasitas dengan menggunakan tiga variasi kecepatan mesin serta tiga variasi kemiringan sudut mata pisau. Pengujian juga melibatkan kapasitas penghancuran tongkol jagung dan tongkol jagung beserta bijinya dengan menggunakan sistem martil. Mesin tersebut dilengkapi dengan motor bensin berkekuatan 5,5 HP dan dapat mencapai putaran maksimum hingga 3600 rpm.

Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa sudut corong input 45° memberikan hasil cacahan yang lebih optimal. Oleh karena itu, corong input dengan sudut tersebut diakui sebagai yang terbaik. Proses pengujian melibatkan variasi sudut kemiringan mata pisau pencacah sebesar 0° , 20° , dan 40° . Kapasitas pencacahan mesin pada rpm 840 adalah 850 kg/jam, pada rpm 988 adalah 1345 kg/jam, dan pada rpm 1088 adalah 1471 kg/jam. Hasil penghancuran tongkol jagung dengan menggunakan saringan diameter 10 mm: Pada rpm 840 adalah 289 kg/jam, Pada rpm 988 adalah 367 kg/jam, dan Pada rpm 1088 adalah 1376 kg/jam. Kapasitas penghancuran tongkol jagung bersama bijinya adalah seperti berikut:- Pada rpm 840: 281 kg/jam- Pada rpm 988: 321 kg/jam- Pada rpm 1088: 352 kg/jam.

Pembuatan bioetanol dari limbah kulit singkong melalui proses hidrolisis asam dan enzimatis, Nopita Hikmiyati dan Noviea Sandrie Yanie (2013). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui konsentrasi H_2SO_4 yang ideal pada saat proses hidrolisis dan waktu fermentasi yang ideal pada seluruh proses fermentasi. Dua tahap proses produksi bioetanol adalah fermentasi dan hidrolisis asam. Kulit singkong dihidrolisis menggunakan larutan H_2SO_4 dalam berbagai variabel kondensasi (0,2,3,4,5, M) pada suhu $120^\circ C$ selama 30 menit. Terakhir, larutan yang dihasilkan dari hidrolisis zat-zat yang berdiferensiasi selama berbagai periode waktu (24, 48, 72, 96, dan 120 jam). Berdasarkan hasil penelitian, konsentrasi H_2SO_4 yang optimal untuk hidrolisis adalah 0,3 M, dan waktu fermentasi ideal adalah 96 jam, dengan waktu tersebut dihasilkan etanol dengan kepadatan 1,052 gram per mililiter.

Pengaruh perlakuan awal hidrolisis ampas sorgum (*Sorghum Bicolor L.*) terhadap Fermentasi untuk produksi bioetanol sebagai energi terbarukan, Stevanny Yulia Margarita Nggai dkk. (2022), Tujuan dari penelitian ini adalah menggunakan *autoklaf* dan gelombang mikro untuk mengukur jumlah asam sulfat yang dihasilkan selama hidrolisis gula. Tahap hidrolisis ampas sorgum disuspensikan dalam

berbagai macam H₂SO₄ encer dan selanjutnya dihidrolisis dalam *autoklaf* (1 atm, 121°C, 30 menit) dan *microwave* (150 °C, 30 menit). Konsentrasi asam sulfat yang digunakan adalah 0,5, 1, 2, dan 5%. *Saccharomyces cerevisiae* digunakan dalam tahap fermentasi selama lima hari dengan konsentrasi inokulum 8%. SEM digunakan untuk studi morfologi residu sorgum, piknometer digunakan untuk menentukan konsentrasi etanol, dan UV-Vis digunakan untuk menganalisis kadar gula reduksi. Pemeriksaan SEM menunjukkan bahwa struktur tersebut dapat dirusak oleh asam sulfat. Ampas sorgum tampak memiliki permukaan yang kasar dan tidak terpadatkan. menurunkan produksi gula hasil terbaik diperoleh ketika asam sulfat 1% dihidrolisis dalam *microwave* dengan konsentrasi 44,97 g/L. hasil maksimum gula pada hidrolisis gunakan *autoklaf* yang memiliki konsentrasi asam sulfat 5% (30,86 g/L). Dengan menggunakan piknometer, kadar etanol sebesar 1,96%, sedangkan nilai GC sebesar 15,76%.

Rancangan alat pembuatan bioetanol dari bahan baku kulit durian, Irvan dkk. (2015), tujuan dari penelitian ini yaitu merancang dan mengembangkan peralatan untuk memproduksi bioetanol dengan menggunakan kulit durian sebagai bahan bakunya dapat memproses 100 liter per siklus dalam satu *batch*. Unit fermentasi dan destilasi adalah salah satu peralatan utama yang telah dirancang. Tangki fermentor ini mempunyai diameter 43 cm dan tinggi 86 cm. Ini memiliki dua pengaduk manual model dayung dan memiliki diameter 30 sentimeter. Tangki destilasi, peralatan penting lainnya, berdiameter 48 cm dan tinggi 54 cm. Ia memiliki tangki air pendingin untuk mengembunkan bioetanol dari bentuk uap dan pemanas untuk memanaskan larutan yang dihasilkan selama fermentasi. Dalam metode *batch*, satu siklus fermentasi memakan waktu tujuh hari tujuh jam. Dibutuhkan delapan hari empat jam untuk satu siklus proses *batch* yang digunakan untuk memproduksi bioetanol. Kelangsungan hidup unit produksi bioetanol termasuk tangki fermentor dan tangki destilasi diperiksa dalam penelitian ini dalam kondisi fermentasi tujuh hari, konsentrasi ragi 6%, dan destilasi pada suhu 80°C. Berdasarkan data, jumlah bioetanol dari fermentasi dan destilasi masing-masing sebesar 8,98% dan 74,96%.

Pra desain pabrik bioetanol dari limbah batang sorgum difermentasikan dengan *Kluyveromyces marxianus* yang dilakukan oleh Irham Raditya Putra dkk.

(2017), yang membahas tentang perancangan pabrik bioetanol dari limbah batang sorgum terlebih dahulu menggunakan tahapan hidrolisis, pre-treatment, pemurnian dan fermentasi. *Kluyveromyces marxianus* adalah mikroorganisme yang digunakan. mikroba ini, yang termasuk anaerob dan menghasilkan karbon dioksida dan etanol. Perkiraan penggunaan premi tahunan pada tahun 2018 adalah sebesar 62.774.588 kL. Produksi bioetanol *batch* otomatis terjadi 330 hari setahun, 24 jam sehari, dengan perencanaan sebagai berikut: Bahan standar: 3430 kg/jam; kapasitas produksi: 3.044.462 kL/tahun. Pada tahun 2018, pabrik bioetanol ini akan dibangun di Kabupaten Belu Nusa Tenggara Timur. Hasil studi ekonomi yang dilakukan adalah sebagai berikut: *Internal Rate of Return*: 10% per tahun, BEP: 42.17%, dan *Pay Out Time*: 1.45 tahun (Favaro dkk., 2017).

Konversi limbah padi menjadi bioetanol melalui *Pretreatment* Alkali-Peroksida Limbah padi, seperti sekam dan dedak, merupakan biomassa lignoselulosa yang memiliki potensi besar untuk dikonversi menjadi bioetanol. Proses konversi ini melibatkan *pretreatment* menggunakan larutan alkali-peroksida untuk menghilangkan lignin dan memecah selulosa. Dalam penelitian ini, tahap fermentasi dilakukan dengan ragi hasil rekayasa genetik yang meningkatkan efisiensi fermentasi hingga 88% dari potensi teoritisnya. Hasil akhir menunjukkan konsentrasi bioetanol yang dihasilkan mencapai sekitar 52 g/L, sehingga limbah padi ini terbukti sebagai bahan baku yang sangat potensial untuk produksi energi terbarukan yang ekonomis. Penelitian ini menunjukkan bahwa metode alkali-peroksida adalah alternatif *pretreatment* yang efisien dan hemat biaya untuk limbah padi (Suresh dkk., 2020).

Penggunaan *ultrasound* untuk Intensifikasi proses hidrolisis pada limbah kulit kentang. Limbah kulit kentang dari industri makanan diproses menggunakan ultrasonikasi untuk mempercepat hidrolisis selulosa menjadi gula. Dalam penelitian ini, tahap hidrolisis dengan bantuan ultrasonik meningkatkan produksi gula *fermentable* dalam waktu yang lebih singkat dibandingkan metode tradisional. Pengaturan optimal pada proses ini, termasuk frekuensi ultrasonik, waktu iradiasi, dan dosis enzim, menghasilkan bioetanol sebesar 65,8 mg/L. Penelitian ini menunjukkan bahwa ultrasonikasi adalah metode *pretreatment* yang efektif dan berpotensi menurunkan biaya dalam skala industri bioetanol.

Table 2. 1 Perbandingan variabel penelitian

No	Peneliti & Tahun	Objek Penelitian	Metode	Parameter Uji	Hasil Utama
1	Nurchaya Nugraha & Tunggul Pramana (2023)	Mesin pencacah limbah sayur	Eksperimental (variasi susunan pisau)	RPM 1800, tipe pisau	Pisau setengah heliks menghasilkan kapasitas 231,4 kg/jam, lebih tinggi dari pisau sejajar 89 kg/jam
2	Jufri dkk (2024)	Mesin pencacah batang pisang	Eksperimental (variasi rpm & sudut pisau)	RPM 840–1088, sudut pisau 0°–40°	Kapasitas tertinggi 1471 kg/jam pada 1088 rpm, sudut input 45° paling optimal
3	Nopita Hikmiyati & Noviea Sandrie Yanie (2013)	Bioetanol dari kulit singkong	Hidrolisis asam + fermentasi	Konsentrasi H ₂ SO ₄ , waktu fermentasi	Konsentrasi optimal 0,3 M, waktu fermentasi 96 jam
4	Stevanny Yulia Margarita Nggai dkk (2022)	Bioetanol dari ampas sorgum	Hidrolisis (<i>autoklaf & microwave</i>) + fermentasi	Konsentrasi H ₂ SO ₄ , metode pemanasan	Kadar gula terbaik 44,97 g/L (<i>microwave</i>), etanol 15,76% (GC)

5	Irvan dkk (2015)	Alat produksi bioetanol kulit durian	Perancangan alat + uji proses	Kapasitas, suhu distilasi	Produksi etanol 74,96% setelah distilasi
6	Irham Raditya Putra dkk (2017)	Pra desain pabrik bioetanol sorgum	Perancangan industri	Kapasitas produksi, ekonomi	IRR 10%, BEP 42,17%, POT 1,45 tahun
7	Favaro dkk (2017)	Bioetanol dari limbah padi	Pretreatment alkali-peroksida + fermentasi	Efisiensi fermentasi	Efisiensi mencapai 88%, etanol ± 52 g/L
8	Suresh dkk (2020)	Bioetanol dari kulit kentang	Ultrasonikasi + hidrolisis	Frekuensi, waktu, dosis enzim	Produksi etanol 65,8 mg/L, proses lebih cepat

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa sebagian besar penelitian masih terpisah antara aspek mekanis (mesin pencacah) dan aspek proses (hidrolisis, fermentasi, dan distilasi). Oleh karena itu, penelitian ini berupaya mengisi celah tersebut dengan merancang dan membangun suatu alat produksi bioetanol yang terintegrasi, sederhana, dan ekonomis, yang mencakup mesin pencacah, tabung hidrolisis-fermentasi, serta sistem distilasi dalam satu rangkaian alat. Selain itu, desain alat difokuskan pada kemudahan manufaktur dan efisiensi energi sehingga dapat diaplikasikan pada skala laboratorium atau penelitian.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Limbah Pertanian

Limbah pertanian adalah sisa yang dihasilkan dari kegiatan budidaya dan hasil panen pertanian yang sudah tidak dimanfaatkan dalam proses utama produksi. Secara umum limbah pertanian terdiri dari bagian tanaman yang tidak digunakan

seperti kulit buah, batang, daun, jerami, tongkol, ampas, serta residu hasil pengolahan industri agro.

Menurut *Food and Agriculture Organization*, limbah pertanian merupakan bagian dari biomassa yang memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan kembali sebagai sumber energi terbarukan, bahan baku industri, maupun pupuk organik. Namun jika tidak dikelola dengan baik limbah pertanian dapat menimbulkan permasalahan lingkungan seperti pencemaran udara, serta bau tidak sedap yang dapat mengganggu kesehatan masyarakat.

Berdasarkan komposisinya sebagian besar limbah pertanian mengandung zat lignoselulosa yang terdiri dari tiga komponen utama, yaitu:

1. Selulosa : polisakarida utama yang menyusun dinding sel tanaman dihidrolisis menjadi glukosa.
2. Hemiselulosa : polisakarida bercabang yang lebih mudah terdegradasi dibandingkan selulosa.
3. Lignin : senyawa kompleks yang berfungsi sebagai penguat struktur tanaman dan sulit terurai.

Kandungan selulosa dan hemiselulosa inilah yang menjadikan limbah pertanian berpotensi untuk dikonversi menjadi bioetanol melalui proses *pretreatment*, hidrolisis, dan fermentasi. Selain aspek energi, pemanfaatan limbah pertanian juga mendukung konsep ekonomi sirkular (*circular economy*) yaitu sistem yang meminimalkan limbah dengan cara mengubah residu menjadi produk bernilai tambah. Dalam konteks penelitian ini, limbah pertanian yang digunakan adalah buah-buahan busuk dan kulit buah sebagai bahan baku utama serta kulit singkong dan kulit nanas sebagai bahan pendukung.

2.2.2 Jenis Limbah yang Berpotensi sebagai Bahan Baku Bioethanol

Limbah pertanian yang berpotensi sebagai bahan baku bioetanol umumnya berasal dari biomassa yang mengandung gula, pati, maupun lignoselulosa (selulosa, hemiselulosa, dan lignin). Berdasarkan sumbernya, limbah pertanian dapat dikelompokkan menjadi limbah perkebunan, limbah tanaman pangan, limbah hortikultura, dan limbah agroindustri. Berikut adalah berbagai jenis limbah pertanian yang memiliki potensi untuk dikonversi menjadi bioetanol.

1) Jerami padi

Jerami padi merupakan hasil sisa panen tanaman padi yang jumlahnya sangat melimpah di negara agraris seperti Indonesia, jerami padi mengandung selulosa dan hemiselulosa dalam jumlah cukup tinggi sehingga berpotensi dikonversi menjadi glukosa melalui proses hidrolisis. Namun, kandungan lignin yang relatif tinggi menyebabkan jerami padi diperlukan pretreatment fisik maupun kimia agar struktur seratnya terbuka dan mudah difermentasi.

2) Tongkol Jagung

Tongkol jagung adalah limbah padat hasil pemipilan jagung yang termasuk biomassa lignoselulosa kaya selulosa dan hemiselulosa, tongkol jagung telah banyak diteliti sebagai bahan baku bioetanol generasi kedua karena ketersediaannya yang melimpah dan tidak bersaing dengan kebutuhan pangan.

3) Ampas Tebu (*Bagasse*)

Ampas tebu merupakan limbah hasil ekstraksi gula dari tanaman tebu. Ampas ini mengandung sekitar 40–50% selulosa dan telah banyak dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler di pabrik gula, ampas tebu juga berpotensi sebagai bahan baku bioetanol setelah melalui proses delignifikasi dan hidrolisis.

4) Kulit Singkong

Kulit singkong merupakan limbah dari pengolahan tanaman umbi-umbian, limbah ini masih mengandung pati residu serta serat selulosa yang dapat diubah menjadi gula sederhana walaupun kandungan ligninnya lebih tinggi dibandingkan bahan berpati murni kulit singkong tetap berpotensi sebagai bahan baku bioetanol dengan perlakuan awal yang tepat.

5) Limbah Kulit Buah-buahan

Berbagai kulit buah seperti kulit pisang, kulit mangga, kulit nanas, dan kulit pepaya mengandung gula alami serta serat yang dapat difermentasi. Kandungan gula yang relatif tinggi pada beberapa jenis kulit buah menjadikannya bahan baku yang lebih mudah difermentasi dibandingkan biomassa berserat tinggi.

6) Ampas Sagu

Ampas sagu merupakan residu dari pengolahan pati sagu. Limbah ini masih mengandung pati dan serat yang dapat dihidrolisis menjadi glukosa, dengan ketersediaannya yang cukup melimpah di daerah penghasil sagu sangat berpotensi sebagai sumber bioetanol alternatif.

7) Jerami Jagung dan Batang Tanaman

Batang tanaman jagung dan tanaman pertanian lainnya merupakan limbah lignoselulosa yang mengandung selulosa cukup tinggi. Biomassa ini dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku bioetanol generasi kedua melalui proses pretreatment dan hidrolisis enzimatis.

8) Limbah Industri Agro

Limbah cair maupun padat dari industri pengolahan pertanian seperti molase (tetes tebu), limbah pengolahan pati, dan residu fermentasi juga sangat berpotensi sebagai bahan baku bioetanol karena masih mengandung gula atau senyawa organik cukup baik yang dapat dikonversi.

2.2.3 Pengertian Bioetanol

Biofuel adalah bahan bakar yang dihasilkan dari biomassa yang terdiri dari tanaman atau sampah organik dan terbagi menjadi dua jenis, yaitu biofuel generasi pertama dan kedua. Biofuel generasi pertama dihasilkan dari bahan pangan sedangkan biofuel generasi kedua dihasilkan dari bahan nonpangan.

Bioetanol itu sendiri adalah etanol (C_2H_5OH) yang diproduksi melalui proses fermentasi bahan baku yang mengandung gula, pati, atau selulosa dengan bantuan mikroorganisme berbeda dengan etanol sintetis berbasis petrokimia, bioetanol berasal dari biomassa sehingga termasuk dalam kategori energi terbarukan dan produksi bioetanol menjadi perhatian global karena potensinya dalam mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil serta menurunkan emisi gas rumah kaca.

Menurut *International Energy Agency*, biofuel seperti bioetanol memiliki peran strategis dalam transisi energi dunia karena dapat langsung digunakan sebagai campuran bahan bakar kendaraan bermotor tanpa modifikasi besar pada mesin. Di Indonesia, pengembangan bioetanol didukung oleh kebijakan energi nasional sebagai bagian dari program diversifikasi energi.

Secara kimia, bioetanol memiliki karakteristik mudah menguap, tidak berwarna, dan memiliki nilai oktan tinggi. Dalam aplikasinya bioetanol sering dicampurkan dengan bensin dalam berbagai rasio seperti E5, E10, hingga E20 untuk meningkatkan kualitas pembakaran dan mengurangi emisi karbon monoksida.

Proses produksi bioetanol pada umumnya melibatkan empat tahap utama, yaitu:

- 1) *Pretreatment* : Proses ini bertujuan untuk memecah struktur kompleks selulosa dan hemiselulosa menjadi gula sederhana yang melibatkan proses fisik, kimia, atau enzimatik.
- 2) Hidrolisis : Pada proses ini, enzim atau bahan kimia digunakan untuk menguraikan selulosa dan hemiselulosa menjadi monosakarida seperti glukosa yang dapat difermentasi.
- 3) Fermentasi : Mikroorganisme seperti ragi *Saccharomyces cerevisiae* mengubah gula sederhana menjadi etanol dan karbon dioksida.
- 4) Distilasi : Etanol yang dihasilkan dari fermentasi biasanya memiliki konsentrasi rendah sehingga proses distilasi digunakan untuk memurnikan etanol hingga mencapai kadar yang dapat digunakan sebagai bahan bakar.

2.2.4 Dasar Teori Perancangan Mesin

Perancangan mesin merupakan proses yang tersistem dalam mengembangkan suatu alat atau sistem mekanik yang mampu menjalankan fungsi yang ditentukan secara efektif, efisien, aman, dan ekonomis. Dalam konteks penelitian ini, perancangan difokuskan pada mesin pengolah limbah pertanian (kulit buah-buahan dan kulit singkong) menjadi bioetanol melalui proses terintegrasi yang meliputi penghancuran, hidrolisis, fermentasi, dan distilasi.

Proses perancangan biasanya terdiri dari beberapa tahapan seperti mengidentifikasi kebutuhan, menentukan spesifikasi teknis, perancangan konsep, analisis teknik, pemilihan material, pembuatan gambar teknik, serta evaluasi dan pengujian hasil perancangan. Setiap tahapan dilakukan secara berurutan dan saling berkaitan untuk menghasilkan desain mesin yang optimal.

2.2.5 Konsep Mekanisme Pencacah

Pisau pencacah umumnya berbentuk *flat blade* (pisau datar), *serrated blade* (bergigi), atau *rotary blade* (pisau berputar). Pemilihan jenis pisau bergantung pada bahan yang akan dicacah.

- 1) *Flat blade*: Digunakan untuk bahan yang lebih lunak seperti jerami.
- 2) *Serrated blade*: untuk limbah yang berserat seperti batang jagung atau ampas tebu.
- 3) *Rotary blade*: Digunakan untuk aplikasi pencacahan yang lebih besar dan berat.

Mekanisme pencacah yang dipilih adalah dengan menggunakan kombinasi antara *Flat blade* dan *Rotary blade*, untuk menghancurkan dan mencacah limbah yang digunakan. Untuk mata Pisau harus terbuat dari material yang keras, tahan lama, dan tahan korosi. Material yang cocok antara lain:

- 1) *Stainless steel* (baja tahan karat): Tahan korosi sehingga cocok untuk pencacahan material basah atau yang mengandung cairan.
- 2) Baja karbon tinggi (*high carbon steel*): Bersifat sangat keras dan tajam tetapi lebih rentan terhadap korosi.
- 3) Baja paduan keras (*alloy steel*) seperti HSS (*High Speed Steel*): Sangat kuat dan tahan terhadap aus.
- 4) *Tungsten carbide*: Untuk pemotongan yang sangat keras dan tahan lama.

Bahan yang akan digunakan adalah *Stainless Steel*. Pisau akan berputar atau bergerak untuk memotong biomassa menjadi ukuran yang lebih kecil. Pisau harus tajam dan dirancang untuk mempertahankan ketajaman selama penggunaan yang terus-menerus.

2.2.6 Konsep Alat Hidrolisis

Hidrolisis dilakukan untuk mengubah selulosa dan hemiselulosa dari limbah pertanian menjadi gula sederhana seperti glukosa, dilakukan secara kimia (dengan asam) atau secara enzimatik (menggunakan enzim selulase). Adapun mekanis yang diperhatikan adalah:

- 1) Reaktor Hidrolisis: Tangki khusus yang dirancang untuk menahan suhu dan tekanan selama hidrolisis sehingga material yang digunakan adalah

stainless steel tipe 304.

- 2) Sistem Pengadukan: Untuk menjaga agar substrat tetap homogen selama reaksi hidrolisis berlangsung.
- 3) Komponen: Reaktor hidrolisis, pengaduk (*agitator*), motor penggerak, kontrol suhu, dan pengatur pH.

2.2.7 Konsep Alat Fermentasi

Gula yang dihasilkan dari hidrolisis difermentasi oleh mikroorganisme (biasanya ragi *Saccharomyces cerevisiae*) menjadi etanol dan karbon dioksida. Adapun mekanis yang harus diperhatikan adalah:

- 1) Reaktor Fermentasi: Wadah atau tangki fermentasi dengan sistem kontrol suhu, pH, dan aerasi. Fermentasi biasanya berlangsung pada suhu 30-35°C.
- 2) Sistem Pendinginan: Fermentasi bersifat eksotermik, sehingga diperlukan mekanisme pendingin untuk menjaga suhu dalam rentang optimal.

2.2.8 Konsep Alat Distilasi

Distilasi tipe *pot still* merupakan sistem distilasi sederhana berbasis batch yang dimana campuran hasil fermentasi dimasukkan ke dalam sebuah bejana pemanas (*boiler*) kemudian dipanaskan hingga mencapai suhu penguapan etanol. Mekanisme kerjanya dapat dijelaskan sebagai berikut:

- 1) Campuran hasil fermentasi dimasukkan ke dalam boiler.
- 2) Sumber panas (*heater* listrik) menaikkan suhu campuran.
- 3) Pada suhu sekitar 78–85°C etanol mulai menguap lebih dahulu dibanding air.
- 4) Uap etanol mengalir melalui pipa uap menuju kondensor.
- 5) Di dalam kondensor kemudian uap didinginkan oleh media air sehingga berubah fase menjadi cair.
- 6) Cairan hasil kondensasi ditampung sebagai bioetanol dengan konsentrasi lebih tinggi.

Proses ini berlangsung hingga sebagian besar etanol dalam campuran berhasil diuapkan. Proses distilasi melibatkan beberapa mekanisme perpindahan panas seperti:

- 1) Konduksi

Panas dari sumber pemanas ditransfer ke dinding *boiler* dan ke campuran cairan.

2) Konveksi

Cairan di dalam boiler bergerak akibat perbedaan temperatur dan mempercepat pemerataan panas.

3) Perubahan Fase (*Latent Heat*)

Saat etanol berubah dari cair menjadi uap membutuhkan energi laten penguapan.

4) Pendinginan pada Kondensor

Uap melepaskan energi laten dan berubah kembali menjadi cair.

Analisis energi pada sistem ini sangat penting dalam perancangan untuk menentukan kebutuhan daya pemanas dan waktu distilasi.

2.2.9 Dasar Perhitungan Motor Penggerak



Gambar 2. 1 Motor listrik

Dasar perhitungan yang digunakan untuk menghitung kecepatan motor listrik untuk mengetahui Daya Watt (Dalam satuan SI) dapat yang berkaitan dengan benda berputar merupakan hasil dari perkalian dari Torsi (T) dan kecepatan sudut (Ω) (“Daya,” 2022), dengan persamaan rumus :

$$P = T \times \omega \quad (2.0)$$

Selain itu, kecepatan sudut pada gerak melingkar dapat kita cari menggunakan persamaan rumus:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (2.1)$$

Pada sebuah benda berputar frekuensi dapat dicari dengan pembagian jumlah

getaran (n) dan waktu (t), dengan persamaan rumus:

$$f = \frac{n}{t} \quad (2.2)$$

Dengan demikian, rumus yang kita gunakan untuk persamaan menghitung daya, kecepatan, serta torsi pada sebuah motor listrik. Karena berkaitan dengan putaran permenit (Rpm) waktu bergetar ditentukan 60 detik permenit, oleh karena itu dapat kita gunakan persamaan rumus berikut:

$$P = T_x \frac{2\pi n}{60} \quad (2.3)$$

Sedangkan untuk mencari luas bidang geser dengan mengalikan tebal antara tebal mata pisau (t) dengan luas bidang potong (h), dengan persamaan rumus:

$$A = t \times h \quad (2.4)$$

Untuk mencari gaya potong pada motor dengan tipe *direct drive*, dengan mengalikan tegangan geser dengan luas permukaannya, dengan rumus sebagai berikut:

$$F = \tau \times A \quad (2.5)$$

Kemudian mencari daya rencana dengan mengalikan daya (P) dan faktor koreksi (Fc) pada pembebanan motor, adapun rumusnya sebagai berikut:

$$Pd = P \times Fc \quad (2.6)$$

Adapun tabel faktor koreksi dalam buku sularso dasar perencanaan dan emilihan elemen mesin, sebagai berikut:

Table 2. 2 Faktor Koreksi Daya Rencana

Kondisi Pembebanan	Faktor Koreksi (f_c)
Beban konstan / sangat ringan	1,0 – 1,2
Beban ringan	1,2 – 1,5
Beban sedang	1,5 – 2,0
Beban berat / sering terjadi kejutan	2,0 – 3,0

2.2.10 Dasar Perhitungan Daya Pengaduk Hidrolisis

Pada proses hidrolisis, pengaduk digunakan untuk menjaga *slurry* biomassa dan air tetap tercampur serta membantu pemerataan kondisi di dalam tabung. Ketika *paddle* berputar, permukaan *paddle* memberikan gaya terhadap *slurry* dan pada saat yang sama menerima gaya tahanan (*drag force*) dari fluida. Tahanan tersebut menyebabkan timbulnya torsi pada poros pengaduk sehingga diperlukan daya dari motor.

Pada perancangan ini, kebutuhan daya pengaduk dihitung menggunakan pendekatan gaya tahanan (*drag force*) pada permukaan *paddle*. Pendekatan ini digunakan dengan mempertimbangkan kecepatan ujung *paddle*, luas permukaan *paddle* yang berhadapan dengan *slurry*, massa jenis *slurry*, dan koefisien *drag*. Persamaan *drag* secara umum digunakan untuk menentukan gaya tahanan yang dialami suatu benda ketika bergerak relatif terhadap fluida.

Ketika *paddle* berputar, titik pada ujung *paddle* memiliki kecepatan linear yang disebut kecepatan ujung *paddle* (*tip speed* atau *peripheral velocity*). Kecepatan tersebut dapat dihitung berdasarkan diameter lintasan dan putaran pengaduk menggunakan persamaan:

$$V = \frac{\pi DN}{60} \quad (2.7)$$

Keterangan:

V = kecepatan ujung *paddle* (m/s)

D = diameter lintasan ujung *paddle* (m)

N = putaran pengaduk (rpm)

π = konstanta lingkaran, dengan nilai pendekatan 3,14

60 = faktor konversi dari menit ke detik

Luas permukaan *paddle* merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk menentukan gaya tahanan yang diterima *paddle* dari *slurry*. Semakin besar luas bidang yang berhadapan dengan fluida, semakin besar gaya tahanan yang dapat terjadi pada kondisi kecepatan dan sifat fluida yang sama. Untuk *paddle* berbentuk persegi panjang, luas bidang satu *paddle* dapat dihitung dengan:

$$A = L \times b \quad (2.8)$$

Keterangan:

A = luas permukaan satu paddle (m²)

L = panjang *paddle* (m)

b = tinggi/lebar bidang paddle (m).

Ketika *paddle* bergerak di dalam *slurry*, terjadi tahanan akibat interaksi antara permukaan *paddle* dengan fluida. Gaya tersebut disebut gaya tahanan atau *drag force*. Perhitungan daya pengaduk pada penelitian ini menggunakan pendekatan gaya drag (*drag force*) pada *paddle*. Metode perhitungan mengacu pada *Nutrient Control Design Manual* yang diterbitkan oleh U.S. *environmental protection agency* (EPA), khususnya pada pembahasan *mechanical paddle mixer*. Dalam metode tersebut, kebutuhan daya pengaduk ditentukan berdasarkan gaya tahanan yang terjadi pada paddle akibat pergerakan relatif paddle terhadap fluida. Persamaan gaya *drag* yang digunakan dinyatakan sebagai berikut:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho A V^2 \quad (2.9)$$

Keterangan:

F_d = gaya *drag* (N)

C_d = koefisien *drag* (-)

ρ = massa jenis fluida/*slurry* (kg/m³)

A = luas bidang yang terkena aliran (m²)

V = kecepatan relatif antara *paddle* dan fluida (m/s).

Table 2. 3 Nilai Koefisien *Drag* (C_d) untuk plat datar

Bentuk/konfigurasi benda	Kondisi	Nilai (C _d)	Sumber
<i>Flat plate</i> 2D	Tegak lurus terhadap arah aliran, α = 90°	1,98	Wen et al.
<i>Flat plate</i> 2D	Tegak lurus terhadap arah aliran	2,01	Data eksperimen yang dirangkum Wen et al.
<i>Flat plate</i> 2D	Tegak lurus terhadap arah aliran	2,06	Data eksperimen yang dirangkum Wen et al.
<i>Flat plate</i> 2D	Tegak lurus terhadap arah aliran,	2,1	Wen, Chuang & Lin

	$Re \approx 25 - 93$		
<i>Rectangular flat plate</i>	Rasio $L/d \rightarrow \infty$	1,98	<i>Mechanical Engineer's Data Handbook, dirangkum ScienceDirect</i>

2.2.11 Besi Hollow

Besi *hollow* merupakan salah satu jenis baja struktural yang banyak digunakan dalam konstruksi ringan hingga menengah karena memiliki bentuk penampang tertutup berupa persegi atau persegi panjang dengan bagian dalam berongga. Material ini umumnya terbuat dari baja karbon rendah (*mild steel*), baja *galvanis*, maupun *zincalume* yang memiliki ketahanan cukup baik terhadap korosi dan kemudahan dalam proses fabrikasi seperti pemotongan dan pengelasan. Secara mekanik besi *hollow* memiliki kekuatan yang baik dalam menahan beban tarik, tekan, dan lentur, serta didukung oleh nilai modulus elastisitas baja yang berkisar 200 GPa, sehingga mampu menahan deformasi elastis dengan baik.



Gambar 2. 2 Besi *Hollow*

(Sumber:Foto pribadi)

Selain itu, bentuk penampang tertutup pada besi *hollow* memberikan momen inersia yang lebih besar dibandingkan profil terbuka dengan berat yang sama, sehingga meningkatkan kekakuan dan ketahanan terhadap deformasi. Besi *hollow* menyediakan berbagai ukuran dan ketebalan sehingga penggunaannya sangat fleksibel untuk berbagai aplikasi seperti struktur rangka mesin. Meskipun memiliki berbagai keunggulan seperti ringan, kuat, dan mudah dipasang, besi *hollow* juga memiliki keterbatasan, yaitu bagian dalam yang rentan terhadap korosi

apabila tidak dilapisi dengan baik serta kemampuan menahan beban berat yang lebih rendah dibandingkan dengan profil baja padat, sehingga pemilihan penggunaannya harus disesuaikan dengan kebutuhan struktur yang direncanakan.

2.2.12 Termokopel

Termokopel merupakan alat sensor suhu yang terdiri dari dua jenis logam berbeda yang disambungkan di satu titik (*junction*) untuk menghasilkan tegangan listrik ketika ada perbedaan suhu antara titik tersebut dan ujung lainnya.



Gambar 2. 3 *Thermocouple*

(Sumber:Foto pribadi)

Prinsip kerja termokopel didasarkan pada efek *Seebeck*, di mana perbedaan suhu pada sambungan dua logam akan menghasilkan tegangan (*voltage*) yang proporsional dengan perbedaan suhu tersebut.

1) Cara kerja termokopel:

- a) *Junction* Panas (*hot junction*): Titik di mana dua logam berbeda (biasanya logam seperti kromel, alumel, atau tembaga) disambungkan dan ditempatkan di tempat yang ingin diukur suhunya.
- b) *Junction* Dingin (*cold junction*): Titik referensi yang biasanya ditempatkan di tempat dengan suhu stabil atau diketahui misalnya suhu ruangan.

Ketika ada perbedaan suhu antara *junction* panas dan *junction* dingin, termokopel akan menghasilkan tegangan kecil yang dapat diukur. Tegangan ini berbanding lurus dengan perbedaan suhu, sehingga memungkinkan pengukuran suhu secara akurat.

2) Jenis-jenis termokopel

Terdapat beberapa jenis termokopel, yang biasanya dibedakan berdasarkan bahan logam yang digunakan, di antaranya:

- a) Tipe K (*Chromel-Alumel*): Cocok untuk suhu tinggi sangat umum digunakan dalam industri dengan rentang suhu hingga 1200°C.
- b) Tipe J (*Iron-Constantan*): Rentang suhu moderat sangat cocok untuk lingkungan dengan suhu hingga 750°C.
- c) Tipe T (*Copper-Constantan*): Sangat sensitif pada suhu rendah dengan rentang suhu hingga 350°C.
- d) Tipe E, N, R, S: Masing-masing memiliki karakteristik yang cocok untuk berbagai aplikasi industri atau laboratorium dengan rentang suhu dan akurasi tertentu.

3) Kegunaan termokopel;

Termokopel banyak digunakan di berbagai aplikasi yang memerlukan pengukuran suhu, seperti:

- a) Industri manufaktur (untuk mengukur suhu pada proses pemanasan dan pendinginan),
- b) Mesin dan peralatan industri (untuk memantau suhu mesin),
- c) Laboratorium (untuk pengujian suhu dalam eksperimen),
- d) Alat-alat rumah tangga (seperti oven, pemanas air).

Pada sistem hidrolisis, fermentasi dan distilasi, sensor suhu yang ditentukan adalah:

- a) Untuk fermentasi: sensor tipe RTD (*Resistance Temperature Detector*) karena bekerja pada suhu relatif rendah (25–35°C) dan membutuhkan akurasi tinggi.
- b) Untuk distilasi: *thermocouple* tipe K karena mampu bekerja pada suhu tinggi (hingga di atas 100°C) dan tahan terhadap lingkungan uap.

Pemilihan ini didasarkan pada pertimbangan:

- 1) Rentang suhu kerja
- 2) Akurasi pengukuran
- 3) Ketahanan terhadap lingkungan lembap dan uap alkohol
- 4) Kemudahan integrasi dengan *temperature controller*

2.2.13 Gearbox motor

Motor *gearbox* merupakan sistem penggerak yang terdiri atas motor listrik dan reduksi roda gigi (*gear reducer*) yang dirangkai menjadi satu kesatuan. Fungsi

utama *gearbox* adalah menurunkan putaran motor listrik menjadi putaran yang lebih rendah sekaligus meningkatkan torsi yang dihasilkan. Dengan adanya reduksi putaran, motor *gearbox* mampu menghasilkan torsi yang lebih besar dibandingkan motor listrik tanpa reduksi, sehingga banyak digunakan pada aplikasi yang membutuhkan putaran rendah dengan beban yang relatif besar, seperti sistem *konveyor*, *mixer*, *agitator*, mesin pengaduk, dan mesin pengolah hasil pertanian.

Secara umum, motor listrik standar memiliki putaran sekitar 1.400–1.500 rpm atau 2.800–3.000 rpm bergantung pada jumlah kutub dan frekuensi sumber listrik. Putaran tersebut umumnya terlalu tinggi untuk proses pengadukan sehingga diperlukan *gearbox* sebagai sistem reduksi agar kecepatan putar sesuai dengan kebutuhan proses. Selain menurunkan putaran, *gearbox* juga meningkatkan torsi keluaran sehingga motor mampu mengatasi hambatan yang timbul selama proses pengadukan.

Pada penelitian ini, motor *gearbox* digunakan sebagai penggerak sistem pengaduk pada tangki hidrolisis. Motor dipilih karena mampu menghasilkan putaran rendah sebesar 60 rpm dengan torsi yang lebih besar sehingga sesuai untuk mengaduk campuran limbah pertanian selama proses hidrolisis tanpa menyebabkan kerusakan struktur bahan maupun pembentukan pusaran (*vortex*) yang berlebihan

Motor *gearbox* bekerja dengan mengubah energi listrik menjadi energi mekanik berupa putaran poros. Putaran tinggi yang dihasilkan motor kemudian diteruskan ke sistem roda gigi di dalam *gearbox*. Melalui perbandingan jumlah gigi (*gear ratio*), putaran poros keluaran akan berkurang, sedangkan torsiya meningkat sesuai dengan rasio reduksi yang digunakan. Hubungan antara putaran masuk dan putaran keluar dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$i = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.10)$$

dengan:

i = rasio reduksi *gearbox*

n_1 = putaran poros motor (rpm)

n_2 = putaran poros keluaran *gearbox* (rpm)

Apabila diketahui motor memiliki putaran sebesar 1.400 rpm dan putaran keluaran yang diinginkan sebesar 60 rpm, maka rasio reduksi *gearbox* adalah:

$$i = \frac{1400rpm}{60 rpm} = 23,33$$

Sehingga *gearbox* yang digunakan memiliki rasio reduksi mendekati 1 : 25, yang merupakan rasio standar yang tersedia di pasaran.



Gambar 2. 4 *Gearbox Motor*

(Sumber:Foto pribadi)

2.2.14 Sistem Pemanas *Band Heater*

Band heater merupakan salah satu jenis alat pemanas listrik yang dirancang berbentuk melingkar dan digunakan untuk memanaskan permukaan silinder seperti pipa, *nozzle*, maupun tabung. Komponen ini banyak digunakan dalam proses industri seperti pada mesin ekstrusi plastik, pemanasan fluida, serta proses distilasi karena kemampuannya dalam memberikan pemanasan yang merata pada permukaan yang melingkar.



Gambar 2. 5 *Band Heater*

(Sumber:Foto pribadi)

Prinsip kerja *band heater* didasarkan pada konversi energi listrik menjadi energi panas melalui elemen pemanas resistif, pada umumnya menggunakan kawat berbahan nikel-kromium (*nichrome*). Ketika arus listrik mengalir melalui elemen tersebut terjadi hambatan listrik yang menghasilkan panas sesuai dengan prinsip pemanasan *Joule*. Panas yang telah dihasilkan kemudian diantarkan ke permukaan benda melalui mekanisme konduksi sehingga suhu pada objek yang dipanaskan dapat meningkat secara bertahap dan terkontrol.

Material yang disusun pada band heater biasanya terdiri dari elemen pemanas, isolator, dan selubung pelindung. Isolator yang umum digunakan adalah *glasswool* yang memiliki ketahanan tinggi terhadap temperatur, sedangkan bagian luar biasanya menggunakan baja tahan karat (*stainless steel*) untuk melindungi komponen internal sekaligus meningkatkan efisiensi perpindahan panas. Pemilihan material ini sangat penting untuk menjamin keamanan dan ketahanan alat terhadap suhu tinggi serta kondisi kerja yang berulang.

Jumlah panas yang dihasilkan oleh *band heater* dapat dianalisis menggunakan hukum *Joule*, dimana energi panas yang dihasilkan sebanding dengan kuadrat arus listrik, hambatan, dan waktu pemanasan. Dalam

perancangannya perlu diperhatikan parameter seperti daya listrik (watt), tegangan kerja, serta luas permukaan pemanasan agar memperoleh distribusi suhu yang optimal sesuai proses yang dibutuhkan.

Band heater memiliki beberapa keunggulan seperti efisiensi pemanasan yang tinggi, distribusi panas yang merata, pemasangan yang mudah, serta kemampuan kontrol suhu yang baik jika dikombinasikan dengan sistem kontrol seperti *thermostat* atau sensor suhu. Namun demikian *band heater* juga memiliki keterbatasan, seperti potensi terjadinya *overheating* apabila tidak dikontrol dengan baik serta penurunan efisiensi apabila pemasangan tidak rapat dengan permukaan yang dipanaskan. Maka dari itu, penggunaan *band heater* harus disesuaikan dengan spesifikasi yang telah diatur dan kebutuhan sistem agar proses kinerja pemanasan tetap optimal dan aman.

2.2.15 Dasar Perhitungan *Heater* pada Proses Hidrolisis

Pada proses hidrolisis, *slurry* biomassa dan air perlu dipanaskan hingga mencapai temperatur proses yang telah ditentukan. Pemanasan dilakukan menggunakan *heater* yang berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi panas. Oleh karena itu, kebutuhan daya *heater* perlu dihitung agar *heater* yang dipilih mampu memberikan energi yang cukup untuk menaikkan temperatur *slurry* dan komponen tabung hidrolisis.

Perhitungan kebutuhan *heater* pada penelitian ini dilakukan berdasarkan kebutuhan energi untuk menaikkan temperatur *slurry* dan tabung hidrolisis berbahan *stainless steel*. Perhitungan menggunakan pendekatan kalor sensibel, yaitu kalor yang diperlukan untuk menaikkan temperatur suatu material tanpa disertai perubahan fase.

Kalor jenis (*specific heat capacity*) merupakan jumlah energi panas yang diperlukan untuk menaikkan temperatur satu satuan massa suatu bahan sebesar satu derajat celsius. Nilai kalor jenis bergantung pada jenis material. Oleh karena itu, pada perhitungan *heater* digunakan nilai kalor jenis masing-masing komponen penyusun sistem, yaitu biomassa, air, dan material tabung.

Dalam perhitungan campuran, kalor jenis rata-rata dapat ditentukan berdasarkan kontribusi massa masing-masing komponen. Persamaannya adalah:

$$C_p = \frac{m_b \times C_{p,b} + m_a \times C_{p,a}}{m_b + m_a} \quad (2.13)$$

dengan:

C_p = kalor jenis campuran (kJ/kg°C)

m_b = massa biomassa (kg)

$C_{p,b}$ = kalor jenis biomassa (kJ/kg°C)

m_a = massa air (kg)

$C_{p,a}$ = kalor jenis air (kJ/kg°C)

Jumlah energi panas yang diperlukan juga dipengaruhi oleh perubahan temperatur selama proses pemanasan. Perubahan temperatur dihitung berdasarkan selisih temperatur akhir dan temperatur awal:

$$\Delta T = T_{akhir} - T_{awal} \quad (2.14)$$

dengan:

ΔT = perubahan temperatur (°C)

T_{akhir} = temperatur akhir proses (°C)

T_{awal} = temperatur awal *slurry* (°C)

Energi panas yang diperlukan untuk menaikkan temperatur suatu material dapat dihitung menggunakan hubungan antara massa, kalor jenis, dan perubahan temperatur.

$$Q = m \times C_p \times \Delta T \quad (2.15)$$

dengan:

Q = energi panas (J)

m = massa material (kg)

C_p = kalor jenis material (J/kg°C)

ΔT = perubahan temperatur (°C)

Selain *slurry*, sebagian energi panas dari heater juga digunakan untuk menaikkan temperatur dinding tabung hidrolisis. Hal ini perlu diperhitungkan karena tabung terbuat dari material *stainless steel* dan memiliki massa tertentu. Energi panas yang diperlukan untuk memanaskan tabung dihitung dengan persamaan:

$$Q_{tabung} = m_{tabung} \times C_{p,tabung} \times \Delta T \quad (2.16)$$

dengan:

Q_{tabung} = energi untuk memanaskan tabung (J)

m_{tabung} = massa tabung (kg)

$C_{p,tabung}$ = kalor jenis *stainless steel* (J/kg°C)

ΔT = perubahan temperatur (°C)

Energi total yang harus disediakan oleh heater merupakan penjumlahan antara energi untuk memanaskan slurry dan energi untuk memanaskan tabung.

$$Q_{total} = Q_{slurry} + Q_{tabung} \quad (2.17)$$

dengan:

Q_{total} = energi total yang dibutuhkan (J)

Q_{slurry} = energi untuk memanaskan *slurry* (J)

Q_{tabung} = energi untuk memanaskan tabung (J)

Setelah energi total yang diperlukan diketahui, selanjutnya ditentukan daya heater. Daya merupakan laju penggunaan atau pemasokan energi terhadap waktu. Secara umum, daya dapat dinyatakan sebagai

$$P = \frac{Q}{t} \quad (2.18)$$

dengan:

P = daya *heater* (W)

Q = energi panas yang dibutuhkan (J)

t = waktu pemanasan (s)

2.2.16 Dasar Perhitungan *Heater* pada Proses Distilasi

Pada proses distilasi, *heater* digunakan untuk memberikan energi panas kepada campuran hasil fermentasi sehingga komponen yang lebih mudah menguap dapat berubah dari fase cair menjadi uap. Uap tersebut selanjutnya dialirkan menuju kondensor untuk mengalami proses pengembunan.

Berbeda dengan proses pemanasan pada tahap hidrolisis, perhitungan kebutuhan energi pada tahap distilasi tidak hanya mempertimbangkan kenaikan temperatur fluida dan tabung, tetapi juga energi yang diperlukan untuk mengubah etanol dari

fase cair menjadi uap. Oleh karena itu, kebutuhan energi pada proses distilasi terdiri atas energi pemanasan fluida, energi untuk mengubah fase etanol, dan energi untuk memanaskan tabung distilasi.

Kalor laten penguapan merupakan energi yang diperlukan untuk mengubah suatu zat dari fase cair menjadi fase uap pada kondisi perubahan fase. Pada proses distilasi, energi ini diperlukan agar etanol yang telah mencapai kondisi penguapan dapat berubah menjadi uap. Secara umum energi yang diperlukan untuk proses penguapan dapat dihitung dengan persamaan:

$$Q_{evap} = m_e L_v \quad (2.19)$$

Keterangan:

Q_{evap} = energi penguapan (kJ)

m_e = massa etanol yang diuapkan (kg)

L_v = kalor laten penguapan etanol (kJ/kg)

Kebutuhan energi total pada proses distilasi merupakan penjumlahan dari beberapa kebutuhan energi. Dalam perhitungan ini, energi total terdiri dari; energi untuk memanaskan fluida, energi untuk menguapkan etanol, dan energi untuk memanaskan tabung distilasi. Secara matematis dapat dituliskan:

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 + Q_{ss} \quad (2.20)$$

Keterangan:

Q_{total} = energi total proses distilasi (kJ)

Q_1 = energi pemanasan fluida (kJ)

Q_2 = energi penguapan etanol (kJ)

Q_{ss} = energi pemanasan tabung *stainless steel* (kJ)

Proses pemanasan pada distilasi dapat dibagi menjadi dua tahap utama. Tahap pertama adalah pemanasan awal, yaitu proses menaikkan temperatur campuran dan tabung hingga mencapai temperatur operasi. Pada tahap ini energi yang diperlukan terutama berasal dari kalor sensibel.

Tahap kedua adalah penguapan, yaitu ketika etanol mengalami perubahan fase dari cair menjadi uap. Pada tahap ini diperlukan energi tambahan berupa kalor laten penguapan. Dengan demikian, kebutuhan heater pada proses distilasi dapat dianalisis berdasarkan dua kondisi tersebut, yaitu:

$$P_{awal} = \frac{Q_1 + Q_{ss}}{t_{awal}} \quad (2.21)$$

Keterangan:

P_{awal} = daya *heater* pada tahap pemanasan awal (W)

Q_1 = energi yang diperlukan untuk memanaskan fluida (J)

Q_{ss} = energi yang diperlukan untuk memanaskan tabung *stainless steel* (J)

t_{awal} = waktu yang diperlukan untuk mencapai temperatur awal proses (s)

$$P_{penguapan} = \frac{Q_2}{t_{penguapan}} \quad (2.22)$$

Keterangan:

$P_{penguapan}$ = daya yang diperlukan untuk proses penguapan (W)

Q_2 = energi yang diperlukan untuk menguapkan etanol (J)

$t_{penguapan}$ = waktu yang digunakan selama proses penguapan (s)

2.2.17 Air Lock

Airlock merupakan suatu mekanisme yang digunakan untuk mengontrol aliran material atau fluida sekaligus mencegah perpindahan udara atau gas secara bebas antara dua ruang yang memiliki perbedaan tekanan. *Airlock* sering digunakan pada sistem perpipaan, tangki, maupun peralatan proses industri seperti sistem distilasi dan pengolahan material untuk menjaga kestabilan tekanan dan mencegah terjadinya gangguan aliran yang dapat masuk.



Gambar 2. 6 Air Lock

(Sumber:Foto pribadi)

Secara prinsip kerja, *airlock* berfungsi sebagai pengunci udara (*air seal*) yang memungkinkan material atau fluida tetap dapat mengalir tanpa menyebabkan kebocoran udara. Pada beberapa aplikasi mekanis seperti *rotary airlock valve*, perangkat ini bekerja dengan rotor berputar yang memiliki kantong-kantong untuk membawa material dari satu sisi ke sisi lain sementara tetap menjaga agar udara tidak ikut berpindah secara bebas. Prinsip ini sangat penting terutama pada sistem yang membutuhkan kontrol tekanan atau isolasi antar ruang.

Penggunaan *airlock* memberikan beberapa keuntungan seperti menjaga efisiensi sistem dengan mencegah kehilangan tekanan dan mengontrol aliran material secara lebih stabil, serta meningkatkan keamanan operasi dengan menghindari masuknya udara yang dapat memicu reaksi yang tidak diinginkan seperti oksidasi atau gangguan proses. Selain itu, *airlock* juga berperan dalam menjaga kebersihan sistem dengan mencegah kontaminasi dari lingkungan luar.

Airlock juga memiliki keterbatasan seperti potensi keausan pada komponen mekanis akibat gesekan, kebutuhan perawatan berkala, serta kemungkinan kebocoran jika tidak dirancang atau dipasang dengan baik. Oleh karena itu, dalam perancangannya perlu diperhatikan faktor seperti jenis material, tekanan kerja, kapasitas aliran, serta kondisi operasi agar *airlock* dapat berfungsi secara optimal.

2.2.18 *Thermometer*

Thermometer merupakan instrumen yang digunakan untuk mengukur temperatur suatu benda atau fluida. Dalam proses produksi bioetanol, pengukuran temperatur memiliki peranan penting karena suhu proses memengaruhi keberhasilan hidrolisis maupun distilasi. Oleh karena itu, pemantauan temperatur dilakukan secara berkala untuk memastikan proses berlangsung sesuai dengan kondisi operasi yang telah ditentukan.

Pada penelitian ini digunakan *thermometer* analog tipe bimetal yang dipasang pada tabung hidrolisis dan tabung distilasi. *Thermometer* ini memiliki rentang pengukuran 0–120 °C, sehingga sesuai untuk memantau temperatur proses hidrolisis pada kisaran 55–60 °C dan proses distilasi pada suhu sekitar 78 °C.

Prinsip kerja *thermometer* bimetal didasarkan pada perbedaan koefisien muai dua jenis logam yang disatukan menjadi satu elemen. Ketika temperatur

berubah, kedua logam akan mengalami pemuaian yang berbeda sehingga elemen bimetal melengkung. Perubahan bentuk tersebut diteruskan melalui mekanisme roda gigi menuju jarum penunjuk sehingga menunjukkan nilai temperatur pada skala pengukuran.

Thermometer bimetal dipilih pada penelitian ini karena memiliki konstruksi yang sederhana, tidak memerlukan sumber daya listrik, mudah dipasang pada tabung proses, serta mampu memberikan pembacaan temperatur secara langsung. Meskipun tingkat ketelitiannya lebih rendah dibandingkan sensor digital, *thermometer* jenis ini telah memadai untuk pemantauan temperatur selama proses hidrolisis dan distilasi pada mesin pengolah limbah pertanian menjadi bioetanol.



Gambar 2. 7 *Thermometer*

(Sumber:Foto pribadi)

2.2.19 Pompa Air

Pompa air merupakan perangkat mekanis yang berfungsi untuk memindahkan fluida dari satu tempat ke tempat lain dengan memberikan energi pada fluida sehingga mampu mengalir melalui sistem perpipaan. Pada mesin pengolah limbah pertanian menjadi bioetanol, pompa air digunakan untuk mensirkulasikan air pendingin menuju kondensor spiral selama proses distilasi berlangsung.

Pada penelitian ini digunakan pompa air sirkulasi yang bekerja secara kontinu untuk menjaga aliran air pendingin di dalam kondensor. Air yang dialirkan berfungsi menyerap kalor dari uap hasil distilasi sehingga uap etanol mengalami proses kondensasi dan berubah menjadi fase cair. Oleh karena itu, kestabilan debit

aliran air sangat berpengaruh terhadap efektivitas perpindahan panas pada kondensor.



Gambar 2. 8 Pompa Air 500L/jam

(Sumber:Foto pribadi)

Prinsip kerja pompa air adalah mengubah energi mekanik dari motor listrik menjadi energi hidrolik sehingga fluida memperoleh tekanan dan kecepatan yang cukup untuk mengalir melalui sistem perpipaan. Pada pompa sentrifugal, energi diberikan oleh *impeller* yang berputar sehingga air terdorong keluar akibat gaya sentrifugal dan mengalir menuju saluran keluaran.

Pemilihan pompa air pada penelitian ini didasarkan pada kemampuannya dalam menghasilkan aliran yang stabil, konsumsi daya yang relatif rendah, serta kemudahan pemasangan dan perawatan. Dengan adanya sirkulasi air yang kontinu, temperatur kondensor dapat dipertahankan sehingga proses pelepasan kalor berlangsung secara efektif dan hasil distilasi bioetanol menjadi lebih optimal.

2.2.20 Computer Aided Design (CAD)

Computer Aided Design (CAD) merupakan teknologi berbasis komputer yang digunakan untuk membantu proses perancangan, pembuatan gambar teknik, serta pemodelan dua dimensi maupun tiga dimensi suatu produk atau komponen mesin. Penggunaan CAD memungkinkan perancang menghasilkan desain yang lebih akurat, mudah dimodifikasi, serta mempercepat proses pengembangan produk dibandingkan dengan metode gambar manual. Selain itu, perangkat lunak CAD juga mampu menghasilkan dimensi, toleransi, serta dokumentasi teknik yang sesuai dengan standar manufaktur sehingga mempermudah proses produksi.

Dalam bidang teknik mesin, CAD tidak hanya digunakan untuk membuat gambar kerja, tetapi juga untuk melakukan visualisasi bentuk, penyusunan

komponen (*assembly*), pemeriksaan interferensi antar komponen, hingga penyusunan gambar detail yang akan digunakan pada proses fabrikasi. Oleh karena itu, teknologi CAD telah menjadi salah satu perangkat utama dalam proses perancangan mesin modern.

Pada penelitian ini, perangkat lunak *SolidWorks* digunakan sebagai aplikasi CAD untuk merancang seluruh komponen mesin pengolah limbah pertanian menjadi bioetanol. Model tiga dimensi yang dibuat meliputi rangka mesin, sistem pencacah, tangki hidrolisis–fermentasi, sistem pengaduk, tabung distilasi, kondensor spiral, serta komponen pendukung lainnya. Model tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam proses simulasi menggunakan metode *Computer Aided Engineering* (CAE).

2.2.21 *Computer Aided Engineering* (CAE)

Computer Aided Engineering (CAE) merupakan teknologi berbasis komputer yang digunakan untuk melakukan analisis dan simulasi terhadap suatu produk sebelum dilakukan proses manufaktur. Melalui CAE, perilaku suatu komponen dapat diprediksi ketika menerima beban, temperatur, maupun kondisi operasi tertentu sehingga kelemahan desain dapat diketahui sejak tahap perancangan. Dengan demikian, proses optimasi desain dapat dilakukan tanpa harus membuat prototipe secara berulang sehingga mampu menghemat waktu, biaya, dan material.

CAE banyak diterapkan pada bidang teknik mesin untuk menganalisis kekuatan struktur, perpindahan panas, dinamika gerak, aliran fluida, hingga umur kelelahan (*fatigue*) suatu komponen. Hasil simulasi yang diperoleh berupa distribusi tegangan, perpindahan (*displacement*), regangan (*strain*), faktor keamanan (*factor of safety*), distribusi temperatur, maupun karakteristik aliran fluida sesuai dengan jenis simulasi yang dilakukan.

Pada penelitian ini, metode CAE digunakan untuk memvalidasi hasil perancangan mesin pengolah limbah pertanian menjadi bioetanol sebelum proses manufaktur. Simulasi yang dilakukan meliputi *static simulation* pada rangka mesin untuk mengetahui distribusi tegangan dan faktor keamanan, *motion analysis* pada sistem penggerak pencacah untuk mengevaluasi karakteristik gerak dan kebutuhan torsi, serta *flow simulation* pada kondensor spiral untuk menganalisis distribusi

temperatur dan perpindahan panas selama proses kondensasi uap bioetanol. Hasil simulasi tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil pengujian aktual mesin sehingga dapat diketahui tingkat kesesuaian antara hasil perancangan, simulasi, dan kondisi nyata.