



**MANUFAKTUR REAKTOR ANAEROB DUA TAHAP
DAN OPTIMASI PRODUKSI BIOHIDROGEN DARI
AMPAS TEBU**

TESIS

OLEH :
Nama : MARKUS GEA
NIM : 55822110003

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MERCU BUANA
JAKARTA
2024**



**MANUFAKTUR REAKTOR ANAEROB DUA TAHAP
DAN OPTIMASI PRODUKSI BIOHIDROGEN DARI
AMPAS TEBU**

TESIS

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk Menyelesaikan
Program Studi Magister Teknik Mesin**

**UNIVERSITAS
MERCU BUANA**

Oleh:

Nama : MARKUS GEA

NIM : 55822110003

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MERCU BUANA
JAKARTA
2024**





HALAMAN PENGESAHAN

Laporan Tesis ini diajukan oleh :

Nama : Markus Gea
NIM : 55822110003
Program Studi : Magister Teknik Mesin
Judul Tesis : **Manufaktur Reaktor Anaerob Dua Tahap dan Optimasi Produksi Biohidrogen dari Ampas Tebu**

Telah berhasil dipertahankan pada sidang di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Strata S2 pada Program Studi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Mercu Buana.

Disahkan Oleh :

Pembimbing 1	: Dr.Eng Deni Shidqi Khaerudini, M.Eng	()
NIDN/NIK	: 8812480018/ 718800020	
Pembimbing 2	: Dr. Nono Darsono, M.Sc.Eng	()
NIP	: 198005142003121006	
Ketua Penguji	: Muhamad Fitri, M.Si., Ph.D	()
NIDN/NIK	: 1013126901/118690617	
Anggota Penguji	: Dr.Eng. Imam Hidayat, MT	()
NIDN/NIK	: 005087502/112750348	

Jakarta, 18 November 2024

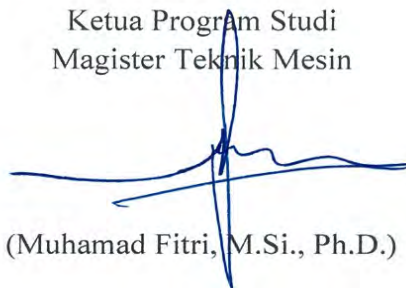
Mengetahui,

Dekan
Fakultas Teknik



(Dr. Zulfa Fitri Ikatrinasari, M.T.)

Ketua Program Studi
Magister Teknik Mesin



(Muhamad Fitri, M.Si., Ph.D.)

PERNYATAAN SIMILARITY CHECK

Saya yang bertanda tangan di bawah ini menyatakan, bahwa karya ilmiah yang ditulis oleh:

Nama : Markus Gea
NIM : 55822110003
Program Studi : Magister Teknik Mesin

dengan judul “**Manufaktur Reaktor Anaerob Dua Tahap dan Optimasi Produksi Biohidrogen dari Ampas Tebu**”, telah dilakukan pengecekan similarity dengan sistem Turnitin pada tanggal 09 November 2024 , didapatkan nilai persentase sebesar 17%.

Jakarta, 30 November 2024

Administrator Turnitin



Saras Nur Pratica, S.Psi., MM

UNIVERSITAS
MERCU BUANA

PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan di bawah ini menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa semua pernyataan dalam Tesis ini:

Judul : Manufaktur Reaktor Anaerob Dua Tahap dan Optimasi
Produksi Biohidrogen dari Ampas Tebu
Nama : Markus Gea
NIM : 55822110003
Program Studi : Magister Teknik Mesin
Tanggal : 18 November 2024

Merupakan hasil studi pustaka, penelitian lapangan, dan karya saya sendiri dengan bimbingan Komisi Dosen Pembimbing yang ditetapkan dengan Surat Keputusan Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Mercu Buana.

Karya ilmiah ini belum pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan pada program sejenis di perguruan tinggi lain. Semua informasi, data, dan hasil pengolahannya yang digunakan, telah dinyatakan secara jelas sumbernya dan dapat diperiksa kebenarannya.

Jakarta, 18 November 2024



(Markus Gea)

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur kepada Tuhan Yesus Kristus, Sang Sumber segala hikmat, kekuatan, dan penghiburan, penulis persembahkan karya ini. Atas kasih dan penyertaan-Nya yang tiada henti, penulis sehingga dapat menyelesaikan tesis dengan judul “Manufaktur Reaktor Anaerob Dua Tahap dan Optimasi Produksi Biohidrogen dari Ampas Tebu” yang disusun sebagai persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Universitas Mercu Buana. Berhasilnya tesis ini tak lepas dari bantuan berbagai pihak yang memberikan dukungan, waktu, sarana dan sumbangan pemikiran kepada penulis.

Oleh karena itu, ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah membantu lancarnya penyelesaian penelitian ini, yaitu ;

1. Prof. Dr. Ir. Andi Adriansyah, M. Eng selaku Rektor Universitas Mercu Buana Jakarta
2. Dr. Zulfa Fitri Ikatrinasari, M.T selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Mercu Buana Jakarta
3. Muhamad Fitri, S.T, M.Si, Ph.D selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Mercu Buana Jakarta
4. Dr.Eng Deni Shidqi Khaerudini selaku dosen pembimbing 1 yang telah membimbing dan mengarahkan dalam penyusunan tesis ini
5. Dr. Nono Darsono M.Sc.Eng selaku dosen pembimbing 2 dari instansi tempat penelitian (BRIN) yang telah mengarahkan dan mendampingi penelitian tesis
6. Muhamad Fitri, S.T, M.Si, Ph.D selaku dosen penguji seminar hasil 1 dan 2 yang telah memberi banyak masukan untuk kesempurnaan tesis ini.
7. Seluruh Dosen Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Mercu Buana yang telah memberikan ilmunya selama perkuliahan.
8. Keluarga yang senantiasa memberikan doa dan dukungan yang tulus kepada penulis sehingga dapat melangkah sejauh ini.
9. Seluruh rekan-rekan Magister Teknik Mesin Universitas Mercu Buana yang telah banyak memberikan dorongan moral dan bantuan selama perkuliahan sampai terselesaikannya tesis ini.

Naskah tesis ini disusun selain untuk memenuhi syarat dalam menyelesaikan studi program magister, juga diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi kemajuan ilmu pengetahuan khususnya di produksi hidrogen berbasis biomassa. Tiada gading yang tak retak, sebagai tanggung jawab atas segala kekurangan, penulis membuka diri untuk segala kritik dan masukan yang konstruktif untuk tulisan ini.

Depok, 18 November 2024

Penulis,

Markus Gea, S.T



ABSTRAK

Penggunaan bahan bakar fosil menyebabkan pencemaran lingkungan yang signifikan akibat emisi karbon dioksida (CO_2), yang memperburuk pemanasan global. Hidrogen dipandang sebagai sumber energi alternatif yang ramah lingkungan karena hanya menghasilkan uap air saat dibakar dan memiliki nilai kalor yang tinggi. Dalam penelitian ini, dirancang reaktor anaerobik dua tahap menggunakan software SolidWorks, dengan konfigurasi reaktor *Continuous Stirred-Tank Reactor (CSTR)* untuk tahap pertama dan *Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)* untuk tahap kedua. Produksi biohidrogen dilakukan melalui fermentasi anaerobik ampas tebu yang diperlakukan dengan NaOH dan H_2O_2 sebagai pra-perlakuan awal, kemudian proses fermentasi anaerob dilakukan sebanyak 16 variasi, kombinasi konsentrasi NaOH (0%, 5%, 7%, 10%) dan campuran molase (0%, 2,5%, 5%, 7,5%) dengan rumen sapi sebagai inokulum. Hasil produksi biohidrogen dianalisis dan dioptimalkan menggunakan software Minitab dengan metode *Response Surface Methodology (RSM)* untuk menentukan kondisi optimal. Reaktor anaerobik berhasil dirancang dan diinstalasi dengan reaktor volume 6 liter, menggunakan material SS 316, serta dilengkapi dengan indikator suhu, pH, tekanan, pengaduk, dan pemanas untuk memastikan kondisi fermentasi yang optimal. Pengujian menunjukkan bahwa reaktor dua tahap mampu memisahkan proses hidrolisis dan asidogenesis dari metanogenesis, sehingga meningkatkan efisiensi degradasi bahan organik dan produksi biogas. Optimasi produksi biohidrogen menunjukkan bahwa kombinasi konsentrasi NaOH 7,17% dan molase 4,92% menghasilkan laju aliran gas sebesar 41,46 mL/hari H_2 dan volume total 124,37 mL H_2 , dengan desirabilitas komposit sebesar 0,5774. Hasil optimasi ini menunjukkan kinerja yang baik, meskipun masih ada potensi untuk peningkatan lebih lanjut. Pola hubungan linier dan kuadratik antara variabel konsentrasi NaOH dan molase menunjukkan bahwa keseimbangan optimal antara kedua faktor ini sangat mempengaruhi produksi hidrogen. Kemudian, efisiensi produksi biohidrogen dari substrat ampas tebu pada proses fermentasi suhu 60 °C (termofilik) dan pH 5,5 menunjukkan bahwa variasi konsentrasi NaOH berpengaruh pada *yield* gas yang dihasilkan. Pada konsentrasi NaOH 7% dengan molase 5%, *yield* gas biohidrogen yang diperoleh sebesar 33,75 mL H_2 /g VS dan efisiensi biohidrogen dalam penelitian ini berada pada kisaran 35,94% - 61,71%. Penelitian ini memberikan wawasan mendalam mengenai rancang bangun reaktor untuk produksi hidrogen dan interaksi faktor-faktor dalam fermentasi yang dapat dioptimalkan lebih lanjut untuk aplikasi skala industri.

Kata kunci: Produksi Hidrogen, Reaktor anaerobik, Ampas tebu, molase, pra-perlakuan awal

ABSTRACT

The reliance on fossil fuels leads to considerable environmental pollution due to carbon dioxide (CO₂) emissions, intensifying global warming. Hydrogen is regarded as an environmentally friendly alternative energy source, as it only emits water vapor when burned and possesses a high heating value. In this study, a two-stage anaerobic reactor was designed using SolidWorks software, with a Continuous Stirred-Tank Reactor (CSTR) configuration for the first stage and an Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) for the second stage. Biohydrogen production was achieved through anaerobic fermentation of NaOH- and H₂O₂-pretreated bagasse. The anaerobic fermentation process was conducted in 16 variations, combining NaOH concentrations (0%, 5%, 7%, 10%) with molasses additions (0%, 2.5%, 5%, 7.5%), using cow rumen as the inoculum. The biohydrogen production results were analyzed and optimized using Response Surface Methodology (RSM) in Minitab software to determine optimal conditions. The anaerobic reactor was successfully designed and constructed with a 6-liter volume, using SS 316 material, and equipped with temperature, pH, pressure, stirrer, and heater indicators to maintain optimal fermentation conditions. Experimental results demonstrated that the two-stage reactor effectively separated hydrolysis and acidogenesis processes from methanogenesis, enhancing the efficiency of organic matter degradation and biogas production. Optimization results revealed that the combination of 7.17% NaOH and 4.92% molasses concentrations achieved a gas flow rate of 41.46 mL/day of H₂ and a total H₂ volume of 124.37 mL, with a composite desirability of 0.5774. These findings indicate promising performance, with potential for further improvement. The linear and quadratic relationships between NaOH and molasses concentrations indicate that an optimal balance between these two variables significantly influences hydrogen production. Additionally, the biohydrogen production efficiency from the bagasse substrate at 60°C (thermophilic) and pH 5.5 demonstrates that varying NaOH concentrations affect gas yield. At 7% NaOH concentration with 5% molasses, a biohydrogen gas yield of 33.75 mL H₂/g VS was obtained, and the biohydrogen efficiency in this study ranged from 35.94% to 61.71%. This study offers valuable insights into reactor design for hydrogen production and highlights the influence of fermentation factors that could be further optimized for industrial-scale applications.

Keywords: Hydrogen production, Anaerobic reactor, Bagasse, Molasses, Pretreatment

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	i
PERNYATAAN SIMILARITY CHECK	ii
HALAMAN PERNYATAAN	iii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iv
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Kebaruan (<i>novelty</i>)	5
1.5 Batasan Masalah.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Energi Baru Terbarukan	8
2.2 Hidrogen.....	10
2.2.1 Sifat kimia	11
2.2.2 Sifat fisika	14
2.3 Produksi Hidrogen.....	15
2.4 Pengolahan Limbah untuk Produksi Hidrogen	18
2.4.1 Limbah pertanian	19
2.4.2 Limbah industri	23
2.5 Pra-perlakuan Awal (<i>pretreatment</i>) dan Hidrolisis	25
2.6 Fermentasi Gelap.....	26
2.6.1 Hidrolisis dan fermentasi terpisah.....	29
2.6.2 Sakarifikasi dan fermentasi simultan	29
2.7 Sistem Reaktor Anaerob.....	31

2.8 Bakteri Anaerob	32
2.9 Pengujian dan Analisis hasil hidrogen	34
2.10 Penelitian Terdahulu	35
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	38
3.1 Tempat Penelitian.....	38
3.2 Diagram Alir Penelitian	38
3.2.1 Perancangan prototipe reaktor anaerob dua tahap.....	38
3.2.2 Diagram alir proses fermentasi anaerob.....	39
3.3 Alat dan Bahan	41
3.3.1 Alat.....	41
3.3.2 Bahan.....	42
3.4 Perancangan dan Pembuatan Reaktor Anaerobik Dua Tahap.....	42
3.4.1 Perencanaan dan pemilihan material.....	42
3.4.2 Desain prototipe reaktor anaerob dua tahap.....	45
3.5 Tahap Preparasi Sampel	47
3.5.1 Persiapan ampas tebu	47
3.5.2 Proses pra-perlakuan awal (<i>pretreatment</i>) dan hidrolisis.....	48
3.6 Tahap Preparasi Inokulum dari Rumen Sapi.....	52
3.7 Tahap Fermentasi untuk pencernaan Anaerob	53
3.7.1 Persiapan alat fermentasi anaerob	53
3.7.2 Pencampuran bahan	54
3.7.3 Proses fermentasi anaerob.....	55
3.7.4 Pengambilan sampel gas	57
3.8 Rancangan Penelitian dengan metode <i>Factorial Design</i>	58
3.9 Pemodelan Optimasi <i>respon surface methodology</i>	60
3.10 Tahap Pengujian dan Pengumpulan Data.....	61
3.10.1 Pengujian prototipe reaktor anaerob dua tahap.....	61
3.10.2 Pengujian <i>total solid</i> dan <i>volatile solid</i>	64
3.10.3 Pengujian kandungan lignoselulosa.....	65
3.10.4 Pengukuran pH	66
3.10.5 Pengukuran volume gas dan laju aliran gas.....	67

3.10.6 Pengujian kandungan komposisi sampel gas.....	69
3.10.7 Evaluasi <i>yield</i> gas dan efisiensi gas	69
3.10.8 Pengumpulan data.....	70
3.11 Tahap Analisis Hasil	71
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	72
4.1 Hasil Perancangan dan pembuatan Reaktor Anaerob Dua Tahap.....	72
4.1.1 Spesifikasi prototipe reaktor anaerob dua tahap	72
4.1.2 Proses instalasi prototipe reaktor anaerob.....	73
4.1.3 Pengujian prototipe reaktor anaerob dua tahap.....	80
4.2 Data Hasil Pengujian dan Pengukuran	81
4.2.1 Hasil pengujian <i>total solid, volatile solid</i>	81
4.2.2 Hasil Pengujian Lignoselulosa.....	82
4.2.3 Hasil Pengukuran pH	84
4.2.4 Hasil pengukuran volume gas dan laju produksi gas (<i>real-time</i>)	85
4.2.5 Hasil pengujian komposisi gas hidrogen.....	88
4.3 Optimasi Produksi Biohidrogen.....	94
4.3.1 <i>Analysis of variance</i>	95
4.3.2 Grafik residual (<i>residual graph</i>)	99
4.3.3 Plot kontur (<i>contour plot</i>).....	103
4.3.4 Grafik permukaan (<i>surface plot</i>).....	106
4.3.5 Plot faktorial (<i>factorial plots</i>).....	107
4.3.6 Optimasi respon (<i>response optimization</i>).....	111
4.4 Efisiensi Produksi Biohidrogen.....	115
4.4.1 Pengaruh pH dan suhu fermentasi terhadap <i>yield</i> gas.....	115
4.4.2 Analisis <i>yield</i> dan efisiensi produksi biohidrogen.....	116
BAB V PENUTUP.....	119
5.1 Kesimpulan.....	119
5.2 Saran.....	120
DAFTAR PUSTAKA	122
LAMPIRAN.....	128

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sifat Kimia H ₂ beserta isotopnya	13
Tabel 2.2 Sifat-sifat termofisika hidrogen	15
Tabel 2.3 Representasi skematis dari berbagai metode <i>pretreatment</i>	25
Tabel 2.4 Produksi biohidrogen dari limbah jalur mikroba	33
Tabel 2.5 Penelitian terdahulu.....	35
Tabel 3.1 Variasi fermentasi anaerob menggunakan metode <i>full factorial</i>	59
Tabel 3.2 Pemodelan Optimasi desain RSM.....	61
Tabel 4.1 Spesifikasi reaktor anaerob dua tahap.....	72
Tabel 4.2 Indikator reaktor anaerob dua tahap.....	73
Tabel 4.3 Hasil pengujian TS dan VS pada ampas tebu	82
Tabel 4.4 Hasil pengujian lignoselulosa pada ampas tebu.....	83
Tabel 4.5 Pengukuran pH bahan	84
Tabel 4.6 Hasil pengujian komposisi gas.....	89
Tabel 4.7 Desain data pemodelan RSM.....	94
Tabel 4.8 <i>Model summary</i> respon volume total	95
Tabel 4.9 Persamaan regresi respon volume total.....	96
Tabel 4.10 Analisis varians (ANOVA) respon volume total.....	96
Tabel 4.11 <i>Model summary</i> respon laju aliran gas.....	97
Tabel 4.12 Persamaan regresi respon laju aliran gas	98
Tabel 4.13 Analisis varians (ANOVA) respon laju aliran gas.....	99
Tabel 4.14 Parameter optimasi.....	112
Tabel 4.15 Solusi.....	112
Tabel 4.16 Prediksi respon ganda	113
Tabel 4.17 <i>Yield</i> biohidrogen berdasarkan penurunan VS.....	116
Tabel 4.18 Perbandingan <i>yield</i> biohidrogen teoritis dan aktual.....	117

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Jalur metabolisme produksi biohidrogen	17
Gambar 2.2 Biomassa lignoselulosa, komposisinya dan produksi hidrogen ...	21
Gambar 2.3 Produksi biohidrogen dari limbah peternakan	22
Gambar 2.4 Produksi biohidrogen dari limbah industri.....	24
Gambar 2.5 Representasi skema hidrolisis dan fermentasi terpisah.....	29
Gambar 2.6 Skema proses sakarifikasi dan fermentasi simultan.....	30
Gambar 2.7 Prospek proses bioproses terkonsolidasi.....	31
Gambar 3.1 Diagram alir manufaktur prototipe reaktor	38
Gambar 3.2 Diagram alir penelitian fermentasi anaerob	40
Gambar 3.3 Desain komponen reaktor.....	46
Gambar 3.4 Desain 2D dan 3D reaktor anaerob dua tahap.....	47
Gambar 3.5 Ampas tebu mesh 60	48
Gambar 3.6 Persiapan Larutan NaOH	49
Gambar 3.7 Proses Perendaman Ampas tebu	50
Gambar 3.8 Ampas tebu direndam kedalam larutan H ₂ O ₂	50
Gambar 3.9 Preparasi inokulum dari rumen sapi.....	53
Gambar 3.10 Alat Fermentasi Anaerob di laboratorium.....	54
Gambar 3.11 Pencampuran bahan.....	54
Gambar 3.12 Pengaturan bahan dan reaktor	55
Gambar 3.13 Pelaksanaan Proses Fermentasi di laboratorium	56
Gambar 3.14 Pengukuran metode air tumpah.....	57
Gambar 3.15 Pengambilan Sampel Gas.....	58
Gambar 3.16 Pengaturan Desain Penelitian.....	60
Gambar 3.17 Persiapan pengujian reaktor anaerob.....	62
Gambar 3.18 Persiapan bahan untuk pengujian reaktor anaerob.....	63
Gambar 3.19 Proses memasukkan bahan ke dalam reaktor	63
Gambar 3.20 Pengukuran pH bahan	67
Gambar 4.1 Plat <i>Stainless Steel</i> 316	74
Gambar 4.2 Tabung reaktor <i>finishing</i>	74

Gambar 4.3 <i>Flange</i> pinggiran tabung	75
Gambar 4.4 <i>Flange</i> penutup tabung.....	76
Gambar 4.5 Packing gasket.....	76
Gambar 4.6 Pengaduk (<i>impeller</i>)	77
Gambar 4.7 Rangka tabung reaktor	78
Gambar 4.8 Rangka dan tabung terpasang.....	78
Gambar 4.9 Pembuatan jalur pipa yang menghubungkan tabung reaktor	79
Gambar 4.10 Reaktor anarob dua tahap.....	80
Gambar 4.11 Grafik pengukuran volume kumulatif H ₂	86
Gambar 4.12 Hasil Kromatogram BGS-23.....	91
Gambar 4.13 Hasil Kromatogram BGS-33.....	92
Gambar 4.14 Hasil Kromatogram BGS-43.....	93
Gambar 4.15 Grafik Residual Volume Total (mL).....	101
Gambar 4.16 Grafik Residual Laju Aliran Gas (mL/hari)	102
Gambar 4.17 Plot kontur	105
Gambar 4.18 Grafik Permukaan	107
Gambar 4.19 <i>Factorial Plots</i> untuk Volume Total	109
Gambar 4.20 <i>Factorial Plots</i> untuk Laju Aliran Gas.....	110
Gambar 4.21 Grafik <i>Composite Desirability</i>	114

UNIVERSITAS
MERCU BUANA

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Foto Dokumentasi di laboratorium.....	129
Lampiran 2 Foto dan Spesifikasi CCTV Penelitian.....	130
Lampiran 3 Laporan Hasil Uji Sampel Gas	132
Lampiran 4 Artikel Jurnal Tesis.....	133

