



DAFTAR ISI

| | |
|--|------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| HALAMAN PERSETUJUAN | iii |
| PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI | vi |
| KATA PENGANTAR | vii |
| DAFTAR ISI..... | ix |
| DAFTAR GAMBAR..... | xi |
| DAFTAR TABEL..... | xiv |
| DAFTAR NOTASI..... | xv |
| INTISARI | xvi |
| ABSTRACT..... | xvii |
| | |
| BAB I PENDAHULUAN | |
| 1.1. Latar Belakang Masalah | 1 |
| 1.2. Rumusan dan Batasan Masalah | 3 |
| 1.3. Keaslian Penelitian | 3 |
| 1.4. Tujuan Penelitian | 6 |
| 1.5. Manfaat Penelitian | 7 |
| | |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI | |
| 2.1. Tinjauan Pustaka..... | 8 |
| 2.1.1. <i>Vinasse</i> sebagai Bahan Baku Produksi Biogas | 8 |
| 2.1.2. Metode Fenton untuk Detoksifikasi <i>Vinasse</i> | 12 |
| 2.1.3. Produksi Biogas melalui <i>Anaerobic Digestion</i> (AD)..... | 16 |
| 2.1.4. Faktor yang Mempengaruhi Produksi Biogas melalui AD..... | 18 |
| 2.2. Landasan Teori | 22 |
| 2.2.1. Reaksi Fenton sebagai Metode Perlakuan Awal <i>Vinasse</i> | 22 |
| 2.2.2. Produksi Biogas dari <i>Vinasse</i> Setelah Perlakuan Awal Metode Fenton. | 24 |
| 2.3. Hipotesis Penelitian | 30 |
| | |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN | |
| 3.1. Bahan Penelitian | 31 |
| 3.1.1. Bahan Baku | 31 |
| 3.1.2. Bahan Inokulum..... | 31 |
| 3.1.3. Bahan Reagen | 32 |
| 3.2. Alat dan Skema Penelitian..... | 32 |
| 3.3. Variabel Penelitian..... | 33 |
| 3.3.1. Perlakuan Awal <i>Vinasse</i> dengan Metode Fenton..... | 34 |
| 3.3.2. Produksi Biogas dari <i>Vinasse</i> | 35 |
| 3.4. Prosedur Penelitian | 36 |
| 3.4.1. Analisis Awal dan Perlakuan Metode Fenton..... | 37 |
| 3.4.2. Analisis Hasil Perlakuan Fenton | 38 |



| | |
|--|--------|
| 3.4.3. Produksi Biogas dari <i>Vinasse</i> | 38 |
| 3.4.4. Analisis Hasil Biogas | 38 |
| 3.4.5. Pengolahan Data Penelitian untuk Pemodelan | 39 |
| BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN | |
| 4.1. Pengaruh Perlakuan Awal Metode Fenton terhadap Karakteristik <i>Vinasse</i> | 42 |
| 4.1.1. Perubahan Senyawa dan Mekanisme Reaksi Fenton pada <i>Vinasse</i> | 42 |
| 4.1.2. Pengaruh pH..... | 45 |
| 4.1.3. Pengaruh Rasio Massa $[H_2O_2]/[COD]$ | 49 |
| 4.1.4. Pengaruh Rasio Massa $[H_2O_2]/[Fe^{3+}]$ | 54 |
| 4.1.5. Kondisi Optimum Reaksi Fenton..... | 58 |
| 4.2. Kinetika Reaksi Fenton..... | 59 |
| 4.2.1. Kinetika Reaksi Fenton dengan Variasi pH..... | 59 |
| 4.2.2. Kinetika Reaksi Fenton dengan Variasi Rasio Massa $[H_2O_2]/[COD]$ | 60 |
| 4.2.3. Kinetika Reaksi Fenton dengan Variasi Rasio Massa $[H_2O_2]/[Fe^{3+}]$ | 61 |
| 4.3. Perhitungan Biaya Perlakuan Awal Fenton | 62 |
| 4.4. Pengaruh Perlakuan Awal Metode Fenton terhadap Produksi Biogas dari <i>Vinasse</i> | 64 |
| 4.4.1. Pengaruh pH Reaksi Fenton terhadap Proses Produksi Biogas | 65 |
| 4.4.2. Pengaruh Rasio Massa $[H_2O_2]/[COD]$ pada Metode Fenton terhadap Proses Produksi Biogas..... | 71 |
| 4.4.3. Penentuan Kondisi Optimum untuk Produksi Biogas dari <i>Vinasse</i> dengan Perlakuan Awal Metode Fenton | 79 |
| 4.5. Kinetika Produksi Biogas dari <i>Vinasse</i> | 80 |
| 4.5.1. Kinetika Produksi Biogas dari <i>Vinasse</i> dengan variasi pH metode Fenton | 80 |
| 4.5.2. Kinetika Produksi Biogas dari <i>Vinasse</i> dengan variasi rasio massa $[H_2O_2]/[COD]$ metode Fenton..... | 87 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | |
| 5.1. Kesimpulan | 92 |
| 5.2. Saran | 93 |
| DAFTAR PUSTAKA | 94 |
| LAMPIRAN-LAMPIRAN | |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|--------------|--|----|
| Gambar 2.1. | Proses produksi bioetanol dari molase | 8 |
| Gambar 2.2. | Tahapan proses <i>anaerobic digestion</i> (AD) beserta jenis mikro organisme yang terlibat (Diadaptasi dari Moraes et al.(2015))..... | 18 |
| Gambar 2.3. | Skema tahapan proses AD | 26 |
| Gambar 3.1. | Skema penelitian perlakuan awal metode Fenton pada <i>vinasse</i> secara <i>batch</i> | 32 |
| Gambar 3.2. | Skema penelitian produksi biogas secara <i>batch</i> dari <i>vinasse</i> yang telah diberi perlakuan awal metode Fenton | 33 |
| Gambar 3.3. | Prosedur umum eksperimen tahap pertama dan kedua dalam penelitian | 37 |
| Gambar 3.4. | Algoritma perhitungan pemodelan kinetika produksi biogas | 40 |
| Gambar 4.1. | Spektrum inframerah <i>vinasse</i> : (A) sebelum diberi perlakuan awal metode Fenton, (B) setelah diberi perlakuan awal metode Fenton untuk variasi pH 3,8 | 42 |
| Gambar 4.2. | Contoh mekanisme perubahan COD yang diprediksi terjadi selama reaksi Fenton (Yap et al., 2018) | 44 |
| Gambar 4.3. | Persentase penurunan COD terhadap waktu pada percobaan variasi pH..... | 45 |
| Gambar 4.4. | Perbandingan nilai <i>Biodegradability Index</i> (Rasio BOD/COD) <i>vinasse</i> sebelum dan setelah reaksi Fenton | 46 |
| Gambar 4.5. | Persentase penambahan besi dan penurunan sulfat pada percobaan variasi pH | 48 |
| Gambar 4.6. | Persentase penurunan COD terhadap waktu pada percobaan variasi variasi rasio massa $[H_2O_2]/[COD]$ (g/g) | 51 |
| Gambar 4.7. | Perbandingan nilai <i>Biodegradability Index</i> (Rasio BOD/COD) <i>vinasse</i> sebelum dan setelah reaksi Fenton untuk variasi rasio massa $[H_2O_2]/[COD]$ | 52 |
| Gambar 4.8. | Persentase penambahan besi dan penurunan sulfat pada percobaan variasi rasio massa $[H_2O_2]/[COD]$ (g/g) | 53 |
| Gambar 4.9. | Persentase penurunan COD terhadap waktu pada percobaan variasi rasio massa $[H_2O_2]/[Fe^{3+}]$ (g/g) | 55 |
| Gambar 4.10. | Perbandingan nilai <i>Biodegradability Index</i> (Rasio BOD/COD) <i>vinasse</i> sebelum dan setelah reaksi Fenton untuk variasi rasio massa $[H_2O_2]/[Fe^{3+}]$ | 56 |
| Gambar 4.11. | Persentase penambahan besi dan penurunan sulfat pada percobaan variasi rasio massa $[H_2O_2]/[Fe^{3+}]$ (g/g)..... | 57 |
| Gambar 4.12. | Perbandingan hasil simulasi pemodelan kinetika reaksi vs data eksperimen reaksi Fenton pada berbagai variasi pH..... | 60 |
| Gambar 4.13. | Perbandingan hasil simulasi pemodelan kinetika reaksi vs data eksperimen reaksi Fenton pada berbagai variasi rasio massa $[H_2O_2]/[COD]$ (g/g)..... | 61 |



| | |
|---|----|
| Gambar 4.14. Perbandingan hasil simulasi pemodelan kinetika reaksi vs data eksperimen reaksi Fenton pada berbagai variasi rasio massa $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{Fe}^{3+}]$ (g/g)..... | 62 |
| Gambar 4.15. Penurunan sCOD terhadap waktu AD berdasarkan variasi pH reaksi Fenton..... | 65 |
| Gambar 4.16. Profil pH terhadap waktu AD berdasarkan variasi pH reaksi Fenton | 66 |
| Gambar 4.17. Profil VFA terhadap waktu AD berdasarkan variasi pH reaksi Fenton..... | 66 |
| Gambar 4.18. Volume biogas kumulatif terhadap waktu pada percobaan berdasarkan variasi pH reaksi Fenton | 68 |
| Gambar 4.19. Volume kumulatif CH_4 terhadap waktu pada percobaan berdasarkan variasi pH reaksi Fenton | 69 |
| Gambar 4.20. Persentase kadar CH_4 dan CO_2 terhadap waktu pada percobaan variasi Fenton pH 3,8 | 70 |
| Gambar 4.21. Jumlah mikroba sebelum dan sesudah proses produksi biogas dari vinasse pada variasi digester: (A) Tanpa Fenton, (B) Tanpa Fenton + Pengenceran, (C) Fenton pH 3, (D) Fenton pH 3,8, dan (E) Fenton pH 5..... | 71 |
| Gambar 4.22. Penurunan sCOD terhadap waktu AD berdasarkan variasi rasio massa $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{COD}]$ reaksi Fenton | 72 |
| Gambar 4.23. Profil pH terhadap waktu AD berdasarkan variasi rasio massa $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{COD}]$ reaksi Fenton..... | 73 |
| Gambar 4.24. Profil VFA terhadap waktu AD berdasarkan variasi rasio massa $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{COD}]$ reaksi Fenton..... | 73 |
| Gambar 4.25. Volume biogas kumulatif terhadap waktu pada percobaan berdasarkan variasi rasio massa $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{COD}]$ reaksi Fenton | 75 |
| Gambar 4.26. Volume CH_4 kumulatif terhadap waktu pada percobaan berdasarkan variasi rasio massa $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{COD}]$ reaksi Fenton..... | 75 |
| Gambar 4.27. Persentase kadar CH_4 dan CO_2 terhadap waktu pada percobaan variasi Fenton rasio massa $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{COD}]=0,47$ | 78 |
| Gambar 4.28. Jumlah mikroba sebelum dan sesudah proses produksi biogas dari vinasse pada variasi digester Fenton rasio massa $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{COD}]$: (A) Tanpa Fenton, (B) Tanpa Fenton + Pengenceran, (C) rasio 0,12, (D) rasio 0,31, (E) rasio 0,47, dan (F) rasio 0,62 | 78 |
| Gambar 4.29. Hasil simulasi data pemodelan dan data eksperimen parameter sCOD, VFA, CH_4 , dan CO_2 untuk <i>vinasse</i> dengan variasi tanpa perlakuan awal metode Fenton | 81 |
| Gambar 4.30. Hasil simulasi data pemodelan dan data eksperimen parameter sCOD, VFA, CH_4 , dan CO_2 untuk <i>vinasse</i> dengan variasi tanpa perlakuan awal metode Fenton dan pengenceran | 81 |
| Gambar 4.31. Hasil simulasi data pemodelan dan data eksperimen parameter sCOD, VFA, CH_4 , dan CO_2 untuk <i>vinasse</i> dengan variasi perlakuan awal metode Fenton pH 3 | 82 |



| | |
|--|----|
| Gambar 4.32. Hasil simulasi data pemodelan dan data eksperimen parameter sCOD, VFA, CH ₄ , dan CO ₂ untuk <i>vinasse</i> dengan variasi perlakuan awal metode Fenton pH 3,8 | 82 |
| Gambar 4.33. Hasil simulasi data pemodelan dan data eksperimen parameter sCOD, VFA, CH ₄ , dan CO ₂ untuk <i>vinasse</i> dengan variasi perlakuan awal metode Fenton pH 5 | 83 |
| Gambar 4.34. Hasil simulasi data pemodelan dan data eksperimen parameter sCOD, VFA, CH ₄ , dan CO ₂ untuk <i>vinasse</i> dengan variasi tanpa perlakuan awal metode Fenton | 87 |
| Gambar 4.35. Hasil simulasi data pemodelan dan data eksperimen parameter sCOD, VFA, CH ₄ , dan CO ₂ untuk <i>vinasse</i> dengan variasi tanpa perlakuan awal metode Fenton dan pengenceran | 87 |
| Gambar 4.36. Hasil simulasi data pemodelan dan data eksperimen parameter sCOD, VFA, CH ₄ , dan CO ₂ untuk <i>vinasse</i> dengan variasi perlakuan awal metode Fenton rasio massa [H ₂ O ₂]/[COD]=0,12 | 88 |
| Gambar 4.37. Hasil simulasi data pemodelan dan data eksperimen parameter sCOD, VFA, CH ₄ , dan CO ₂ untuk <i>vinasse</i> dengan variasi perlakuan awal metode Fenton rasio massa [H ₂ O ₂]/[COD]=0,31 | 88 |
| Gambar 4.38. Hasil simulasi data pemodelan dan data eksperimen parameter sCOD, VFA, CH ₄ , dan CO ₂ untuk <i>vinasse</i> dengan variasi perlakuan awal metode Fenton rasio massa [H ₂ O ₂]/[COD]=0,47 | 89 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 1.1. Penelitian terdahulu yang relevan mengenai studi produksi biogas dari <i>vinasse</i> dan <i>treatment</i> yang telah dilakukan terhadap <i>vinasse</i> | 4 |
| Tabel 2.1. Karakteristik <i>vinasse</i> (Syaichurrozi (2016)) | 9 |
| Tabel 2.2. Senyawa dalam biogas (Al Seadi et al., 2008b)..... | 17 |
| Tabel 2.3. Rentang konsentrasi inhibitor pada <i>trace elements</i> (Deublein and Steinhauser (2008)) | 20 |
| Tabel 2.4. Hubungan temperatur operasi dengan HRT minimum (Al Seadi et al. (2008b))..... | 21 |
| Tabel 3.1. Karakteristik <i>vinasse</i> yang digunakan dalam penelitian | 31 |
| Tabel 3.2. Karakteristik <i>effluent</i> digester aktif yang digunakan dalam penelitian..... | 31 |
| Tabel 3.3. Variabel penelitian tahap 1 (reaksi Fenton) | 35 |
| Tabel 3.4. Variabel penelitian tahap 2 (produksi biogas) | 36 |
| Tabel 4.1. Gugus fungsi yang teridentifikasi dari hasil uji FTIR | 43 |
| Tabel 4.2. Perubahan konsentrasi besi dan sulfat sebelum dan setelah proses Fenton pada percobaan variasi pH..... | 47 |
| Tabel 4.3. Perubahan konsentrasi besi dan sulfat sebelum dan setelah proses Fenton pada percobaan variasi rasio massa $[H_2O_2]/[COD]$ (g/g)..... | 52 |
| Tabel 4.4. Perubahan konsentrasi besi dan sulfat sebelum dan setelah proses Fenton pada percobaan variasi rasio massa $[H_2O_2]/[Fe^{3+}]$ (g/g)..... | 57 |
| Tabel 4.5. Perbandingan karakteristik <i>vinasse</i> sebelum dan sesudah reaksi Fenton pada kondisi optimum..... | 58 |
| Tabel 4.6. Nilai k' untuk reaksi Fenton pada berbagai variasi pH..... | 60 |
| Tabel 4.7. Nilai k' untuk reaksi Fenton pada berbagai variasi rasio massa $[H_2O_2]/[COD]$ (g/g) | 61 |
| Tabel 4.8. Nilai k' untuk reaksi Fenton pada berbagai variasi rasio massa $[H_2O_2]/[Fe^{3+}]$ (g/g) | 62 |
| Tabel 4.9. Biaya dasar reagen dan tarif dasar listrik | 63 |
| Tabel 4.10. Parameter-parameter kinetika hasil simulasi model matematis untuk masing-masing digester pada berbagai variasi pH metode Fenton | 84 |
| Tabel 4.11. Parameter-parameter kinetika hasil simulasi model matematis untuk masing-masing digester pada berbagai variasi rasio massa $[H_2O_2]/[COD]$ metode Fenton | 89 |
| Tabel 4.12. Perbandingan nilai Y_{CH_4/X_2} penelitian ini dengan peneliti lainnya | 91 |



DAFTAR NOTASI

| | | |
|-----------------|---|---|
| COD | = | <i>chemical oxygen demand</i> (mg/L) |
| sCOD | = | <i>soluble chemical oxygen demand</i> (mg/L) |
| AD | = | <i>anaerobic digestion</i> |
| k' | = | konstanta reaksi <i>pseudo</i> orde satu (menit ⁻¹) |
| μ_{m_1} | = | laju pertumbuhan spesifik maksimum mikroba asidogenik (hari ⁻¹) |
| μ_{m_2} | = | laju pertumbuhan spesifik maksimum mikroba metanogenik (hari ⁻¹) |
| K_{S_1} | = | konstanta setengah jenuh mikroba asidogenik terhadap substrat (mg sCOD/mg sel) |
| K_{S_2} | = | konstanta setengah jenuh mikroba metanogenik terhadap substrat (mg sCOD/mg sel) |
| $Y'_{X_1/sCOD}$ | = | yield massa sCOD yang dikonsumsi dan VFA yang dihasilkan per satuan massa bakteri asidogenik (mg sel/mg sCOD) |
| $Y_{VFA/sCOD}$ | = | yield massa VFA dihasilkan per satuan massa sCOD (mg VFA/mg sCOD) |
| Y_{CH_4/X_2} | = | yield massa metana dihasilkan per satuan massa bakteri metanogenik (mg CH ₄ /mg sel) |
| Y_{CO_2/X_2} | = | yield massa karbon dioksida dihasilkan per satuan massa bakteri metanogenik (mg CO ₂ /mg sel) |
| $Y'_{CH_4/VFA}$ | = | yield massa metana yang dihasilkan per satuan massa VFA (mg CH ₄ /mg VFA) |
| k_{d_1} | = | konstanta laju kematian mikroba asidogenik (hari ⁻¹) |
| k_{d_2} | = | konstanta laju kematian mikroba metanogenik (hari ⁻¹) |
| k_1 | = | kecepatan penurunan produksi metana (mg/L/hari) |
| k_2 | = | kecepatan penurunan produksi karbon dioksida (mg/L/hari) |
| MAPE | = | <i>Mean Average Percentage Error</i> (%) |