

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Karakteristik Limbah Sekam Padi

Sektor pertanian termasuk salah satu bidang usaha yang turut menopang perekonomian di Indonesia. Pertanian tidak hanya penting dari sudut pandang ekonomi, bahkan limbah pertanian, seperti jerami gandum dan jerami padi dapat berperan penting dalam memenuhi permintaan energi yang tumbuh dari masyarakat secara berkelanjutan (Chandra et al., 2012). Seperti halnya sektor peternakan, wilayah pertanian yang cukup luas dan intensitas kegiatan yang tinggi tentu menyebabkan timbulan limbah yang banyak. Sebagai contoh adalah tanaman padi saat musim panen raya dapat menghasilkan limbah berupa jerami sekitar 3,0-3,7 ton/ha karena menjadi komoditas pangan utama.

Limbah pertanian termasuk biomassa yang mengandung lignoselulosa. Lignoselulosa tersebut terdiri dari selulosa, hemiselulosa, lignin, ekstraktif, dan bahan anorganik pendukung lainnya. Tiga komponen utamanya menjadi sumber penting yang dapat menghasilkan produk bernilai, seperti gula setelah melalui proses fermentasi, bahan kimia dan bahan bakar cair adalah selulosa, hemiselulosa, dan lignin (Hendriks & Zeeman, 2009). Biomassa dengan lignoselulosa tinggi biasa didapat dari kayu-kayuan, jerami, rerumputan, limbah pertanian, sisa hasil hutan, limbah industri kayu dan kertas dan bahan berserat lainnya (Appels et al., 2011). Pada Tabel 2.1 disajikan perbandingan komponen lignoselulosa pada beberapa biomassa. Diperlukan perlakuan pendahuluan pada bahan lignoselulosa sebelum proses fermentasi untuk mencapai hasil maksimal (Khorshidi & Arikan, 2008; Taherzadeh & Karimi, 2008).

Tabel 2.1. Komponen Lignoselulosa Beberapa Biomassa

Biomassa Lignoselulosa	Selulosa (% berat)	Hemiselulosa (% berat)	Lignin (% berat)	Abu (% berat)
Sekam padi	58,852	18,03	20,9	0,16-1
Jerami padi	28-36	23-28	12-16	15-20
Tandan kosong kelapa sawit	36-42	25-27	15-17	0,7-6
Ampas tebu	32-44	27-32	19-24	1,5-5

Biomassa Lignoselulosa	Selulosa (% berat)	Hemiselulosa (% berat)	Lignin (% berat)	Abu (% berat)
Bambu	26-43	15-26	21-31	1,7-5
Kayu keras	40-45	7-14	26-34	1
Kayu lunak	38-49	19-20	23-30	1

(Mulder, 1996)

Limbah pertanian merupakan limbah organik yang mudah terurai yang mengandung unsur karbon (C). Kandungan unsur C ini dapat mempercepat proses penguraian oleh mikroorganisme (Risberg et al., 2013). Kandungan rasio C/N yang rendah menyebabkan nitrogen akan dibebaskan dan dikumpulkan dalam wujud amoniak (NH₄). Rasio C/N antara 20-30 optimum untuk *anaerobic digestibility* (AD) (Igoni et al., 2008). Limbah organik yang bernilai C/N tinggi dapat dicampur dengan yang lebih rendah sehingga diperoleh nilai rasio C/N yang seimbang dan produksi biogas dapat berjalan optimum.

Beras merupakan salah satu hasil pertanian di Indonesia. Berdasarkan data yang dihimpun dari Direktorat Pangan dan Pertanian (2013), dapat diketahui bahwa tanaman padi menghasilkan gabah (50%) dan jerami (50%). Kemudian dari gabah dapat dihasilkan beras pecah kulit (80%) dan sekam (20%). Dari beras pecah kulit dapat diperoleh beras (61%), menir (10%) dan dedak (9%). Selanjutnya dari beras dan menir dapat dihasilkan pangan pokok seperti beras kepala, beras giling berkualitas, beras aromatik, beras instan dan beras kristal, kemudian pangan fungsional seperti beras yodium, beras IG rendah, beras bernutrisi tinggi, beras lembaga, beras Fe tinggi dan panganan seperti kue basah, kue kering serta menjadi bahan baku industri, yang terdiri dari tepung (tepung BKP, tepung instan, pangan olahan/bihun, dan bahan untuk industri tekstil) dan pati (pangan olahan, modifikasi pati, dan gum/perekat untuk industri tekstil). Di sisi lain dedak dapat digunakan untuk pembuatan pakan, pangan serat dan minyak. Bahan sekam padi seperti pada Gambar 2.1 dapat dihasilkan arang sekam, abu gosok, bahan bakar, silikat, dan karbon aktif. Bahan sekam padi juga dapat diolah menjadi kompos, pakan/*silage*, bahan bakar, media jamur, kertas dan papan partikel. Dapat diambil kesimpulan bahwa beras yang dihasilkan dari tanaman padi tidak hanya digunakan untuk pangan pokok, tetapi juga diolah

menjadi berbagai produk berupa pangan fungsional, penganan dan bahan baku industri.



Gambar 2.1. Limbah Sekam Padi

Sekam padi biasa dimanfaatkan sebagai media tanam baik dalam bentuk sekam padi asli maupun dalam bentuk sekam padi yang setelah dikarbonisasi atau biasa disebut dengan arang sekam. Selain itu, petani mengatasi limbah pertanian dengan cara dibakar dan ditimbun, padahal cara tersebut dapat merugikan petani dan lingkungan sekitar karena pembakaran yang dilakukan dapat menghasilkan gas CO₂ yang berbahaya bagi kesehatan. Sementara itu, penimbunan limbah di dalam tanah dapat menjadi faktor penyebab penyakit bagi pertanaman selanjutnya. Salah satu pola pengelolaan limbah yang tepat agar limbah tersebut dapat dimanfaatkan, yaitu dengan mengolah limbah menjadi biogas. Biogas yang dihasilkan dapat dimanfaatkan oleh petani sebagai sumber energi, sedangkan hasil sampingan berupa pupuk organik dapat dimanfaatkan untuk pertanaman selanjutnya. Limbah biogas yang telah hilang gasnya (*slurry*) merupakan pupuk organik yang sangat kaya akan unsur-unsur yang sangat dibutuhkan tanaman.

Unsur yang dibutuhkan tanaman adalah unsur hara. Pupuk organik mengandung unsur hara yang dibutuhkan tanaman. Sifat-sifat pupuk organik juga akan memperbaiki sifat fisika dan biologi tanah yang menguntungkan bagi tanaman. Berdasarkan kondisi tersebut kita juga bisa mengurangi anggaran untuk membeli pupuk organik dengan memanfaatkan *slurry* biogas.

2.2. Biogas

2.2.1. Pengertian Biogas

Biogas adalah gas yang mudah terbakar (*flamable*) yang dihasilkan dari proses fermentasi bahan-bahan organik oleh bakteri-bakteri anaerob yang berasal dari limbah pertanian, peternakan maupun limbah manusia. Guna menghasilkan biogas dalam jumlah dan kualitas tertentu, suhu, kelembapan, dan tingkat keasaman (pH) dalam digester perlu diatur. Biogas sendiri merupakan gabungan dari gas metana (CH₄), gas CO₂, dan gas lainnya (Ullah Khan et al., 2017). Biogas merupakan gas yang memiliki berat sekitar 20% lebih ringan dari udara, suhu pembakaran 650 – 750 °C, tidak berwarna dan berbau, dan nilai kalor gas metana sebesar 20 MJ/m³ dengan efisiensi pembakaran 60% pada kompor konvensional biogas (Wahyuni, 2011). Komponen biogas yang paling penting adalah gas metan, selain itu ada gas-gas lain yang dihasilkan dalam suatu biodigester. Berikut adalah komposisi gas yang terdapat dalam biodigester:

2.2.2. Komposisi Biogas

Komposisi biogas antara lain:

Tabel 2.2. Komposisi Biogas

Komponen	Komposisi (%)
Metana (CH ₄)	54 – 70
Karbon Dioksida (CO ₂)	27 – 35
Hidrogen Sulfida (H ₂ S)	0 – 0,5
Karbon Monoksida (CO)	<0,2
N ₂ , H ₂ , NH ₃	0 – 1

(Hilkiah Igoni et al., 2008)

2.2.3. Bakteri Pembentuk Biogas

Terdapat 3 kelompok bakteri yang dapat memproduksi biogas, yaitu:

Tabel 2.3. Kelompok Bakteri Pembentuk Biogas

Kelompok Bakteri	Nama Bakteri
Fermentatif	Steptococci, Bacteriodes, dan beberapa jenis Enterobactericeae
Asetogenik	Desulfovibrio
Metana	Mathanobacterium, Mathanobacillus, Methanosacaria, dan Methanococcus

2.2.4. Manfaat Biogas

Memproduksi biogas dapat memberikan berbagai manfaat, antara lain: (1) mengurangi pengaruh gas rumah kaca, (2) mengurangi polusi bau yang tidak sedap, (3) menghasilkan daya dan panas, dan (4) memberikan hasil samping untuk pupuk dengan kandungan N, P dan K cukup baik, campuran makanan ternak, media tanam jamur, dan sebagainya (Widihati et al., 2013). Manfaat energi biogas dapat digunakan sebagai pengganti bahan bakar khususnya minyak tanah dan gas elpiji. Dalam skala besar, biogas dapat digunakan sebagai pembangkit energi listrik karena menghasilkan panas dan daya (Hozairi et al., 2012). Sumber energi biogas yang utama yaitu kotoran ternak sapi, kerbau, babi, kuda, kotoran cair dari peternakan ayam, limbah rumah tangga, sampah organik dari pasar dan industri makanan serta limbah-limbah pertanian (Okeh et al., 2014). Proses produksi biogas akan menghasilkan zat sisa, baik dari kotoran ternak maupun dari limbah-limbah pertanian yang dapat langsung dipergunakan sebagai pupuk organik pada tanaman (Hozairi et al., 2012).

Penggunaan biogas sebagai bahan bakar yang bersih dan ramah lingkungan telah menciptakan dampak yang positif terhadap isu ekonomi, ekologi dan energi seperti mengurangi ketergantungan energi fosil, mengurangi polusi atmosfer yang disebabkan oleh emisi gas, dan meminimalkan efek gas rumah kaca (Papacz, 2011). Biogas merupakan bahan bakar alternatif yang tepat untuk menggantikan sumber energi dari bahan baku fosil. Aplikasi biogas untuk berbagai kebutuhan dapat dilihat pada Tabel 2.4 di bawah ini.

Tabel 2.4. Aplikasi Biogas pada Berbagai Kegiatan

Aplikasi	1 m³ Biogas
Penerangan	60-100 watt lampu pijar selama 6 jam
Pengganti Bahan Bakar	Minyak tanah 0,7 Kg
Daya Poros	Menggerakkan 1 Hp mesin durasi 2 jam
Pembangkit Listrik	Menghasilkan listrik sebesar 1,25 kWh
Memasak	Memasak 3 jenis makanan dengan 5-6 anggota keluarga
	Setara Elpiji 0,46 kg

(Kasisira & Muiyaya, 2009; Wahyuni, 2009)

2.3. Proses Pembuatan Biogas

Pada umumnya proses AD terjadi pada empat tahap yaitu hidrolisis, fermentasi (asidogenesis), asetogenesis, dan metanogenesis (Appels et al., 2011; Bruni, 2010), tahapan tersebut diantaranya:

1) Hidrolisis

Pada proses hidrolisis diawali dengan penguraian bahan organik kompleks atau senyawa rantai panjang menjadi senyawa yang lebih sederhana seperti karbohidrat, protein dan lemak. Pada proses hidrolisis terjadi perubahan struktur dari bentuk senyawa polimer menjadi bentuk monomer. Senyawa-senyawa hasil penguraian diantaranya senyawa asam organik, glukosa, etanol, CO₂, dan hidrokarbon. Senyawa tersebut dimanfaatkan oleh bakteri sebagai sumber karbon dan energi. Reaksi umum dapat dilihat sebagai berikut:



2) Fermentasi (Asidogenesis)

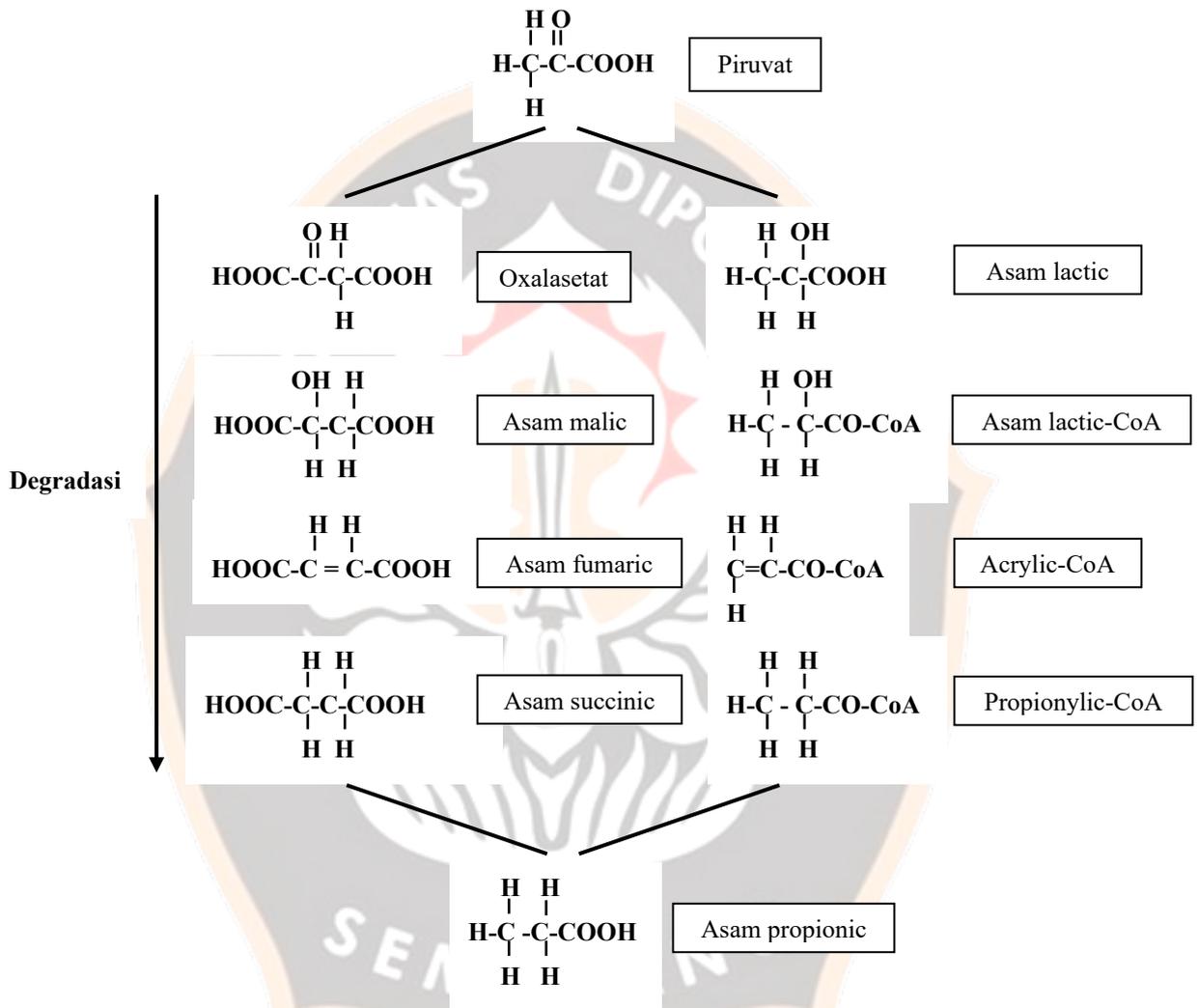
Pada tahap ini produk hasil proses hidrolisis dikonversi oleh bakteri pembentuk asam menjadi asam lemak volatil, alkohol, aldehid, keton, amonia, karbondioksida, air dan hidrogen (Bruni, 2010). Asam-asam organik yang terbentuk adalah asam asetat, asam propionat, asam butirat dan asam valerat (Deublein & Steinhauser, 2008). Reaksi asidogenesis tersaji pada Gambar 2.2:



Glukosa asam butirat



Glukosa asam propionat



Gambar 2.2. Degradasi Piruvat
(Deublein & Steinhauser, 2008)

3) Asetogenesis

Metanogen tidak dapat menggunakan atau mengolah asam lemak volatil dengan empat atau lebih rantai karbon secara langsung. Pada rangkaian prosesnya bakteri asetogenik penghasil hidrogen melakukan oksidasi pada asam-asam organik terlebih dahulu menjadi asam asetat dan hidrogen melalui

pemanasan yang rendah dan air limbah yang dihasilkan sedikit (Li et al., 2011; Yang et al., 2015). Di Amerika metode SS-AD telah digunakan untuk mengkonversi limbah organik yang memiliki kandungan *solid* tinggi menjadi biogas. Bahan baku potensial untuk SS-AD adalah bahan baku lignoselulosa, contohnya: limbah tanaman pangan dan limbah hasil hutan. Di Eropa sistem SS-AD digunakan sejak tahun 1990-an untuk mengolah *municipal solid waste* (Liew et al., 2011).

Berikut adalah parameter-parameter yang mempengaruhi sistem pada kondisi SS-AD:

2.4.1. Suhu

Gas dapat diproduksi pada rentang suhu 4-60°C dan suhu dijaga konstan. Semakin tinggi suhu, reaksi juga akan semakin cepat namun bakteri akan semakin berkurang. Masing-masing jenis bakteri dapat hidup dan berkembang secara optimal pada rentang suhu yang sesuai, kondisi tersebut secara detail dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5. Pengaruh Suhu terhadap Daya Tahan Hidup Bakteri

Jenis Bakteri	Rentang Suhu (°C)	Suhu Optimum (°C)
Cryophilic	2 – 20	12 – 18
Mesophilic	20 – 45	30 – 40
Thermophilic	45 – 75	50 – 60

(Harold, 1965)

Suhu memiliki pengaruh yang signifikan pada proses AD bahan organik dan produksi gas. AD berlangsung baik pada suhu 30-40°C untuk kondisi mesofilik dan pada suhu 45-60°C untuk kondisi termofilik. Kecepatan fermentasi mengalami penurunan ketika suhu dibawah 20°C. Pada umumnya suhu optimal untuk bakteri mesofilik dicapai pada 35°C, namun untuk bakteri termofilik optimal pada suhu 55°C (Sahirman et al., 1995).

Pada dasarnya SS-AD dapat dioperasikan pada kondisi mesofilik maupun kondisi termofilik dengan masing-masing berada pada rentang 20-45°C untuk mesofilik dan 45-65°C untuk termofilik (Yu & Wensel, 2013). Proses fermentasi pada kondisi suhu rendah menghasilkan asam lemak dan alkohol akibat dari mikroorganisme metanogen yang mengalami deaktivasi sehingga proses

pencernaan tidak berjalan dengan sempurna. Kondisi tersebut menyebabkan pH turun dan biogas tidak lagi diproduksi secara maksimal bahkan stop produksi (Schnürer & Jarvis, 2010). Sedangkan pada suhu terlalu tinggi mengakibatkan menurunnya produktifitas biogas akibat dari terbentuknya *volatile gas* berupa ammonia sehingga menghambat aktivitas bakteri *methanogenic* dalam menghasilkan gas metana (Fezzani & Cheikh, 2010; Khalid et al., 2011).

Perbandingan suhu termofilik dengan mesofilik yaitu aktivitas mikroorganisme yang dihasilkan lebih tinggi 25-50% pada suhu mesofilik dibanding termofilik dan menyebabkan produktifitas biogas lebih baik. Karakteristik mikroorganisme pada kondisi termofilik lebih sensitif terhadap gangguan suhu sedangkan pada suhu mesofilik mikroorganismenya lebih tahan terhadap perubahan kondisi lingkungan (Teghammar et al., 2012). Kerugian lain dari kondisi termofilik adalah diperlukan biaya penanganan yang lebih tinggi dan kurang stabilnya kondisi digester (Akwaka et al., 2014).

2.4.2. pH

Kisaran pH 7-7,5 merupakan kondisi netral yang disukai oleh kebanyakan mikroorganisme. Saat biogas diproduksi, pertumbuhan mikroorganisme yang optimal berada pada pH yang berbeda (Schnürer & Jarvis, 2010). pH pada rentang 6,8-7,6 merupakan kondisi optimal untuk bakteri metanogen dan saat pH berada pada <6,6 pertumbuhan bakteri metanogen mengalami penurunan, sedangkan bakteri pada proses hidrolisis dan acetogenesis optimal bekerja pada rentang pH 5,5-6,6 (Jha et al., 2011). Jika pH berada dibawah 6,5, maka produksi asam organik oleh bakteri hidrolitik dapat menyebabkan penurunan pH yang lebih drastis yang menyebabkan kegiatan fermentasi oleh mikroorganisme berhenti (Deublein & Steinhauser, 2008). Penurunan pH dapat dikontrol dan ditangani dengan melakukan penambahan natrium hidroksida atau natrium bikarbonat (Logan & Visvanathan, 2019). Apabila pH >8,5 maka dapat menghambat proses AD (Weiland, 2010). Bakteri metanogen adalah bakteri yang sensitif terhadap kondisi asam yang menyebabkan pertumbuhan bakteri metanogen tersebut

terhambat (Kangle et al., 2012). Mengacu pada beberapa kondisi maka ditetapkan bahwa pH optimal pada AD berada pada rentang 6,8-8,0 (Akwaka et al., 2014).

2.4.3. Alkalinitas

Pada sistem AD terdapat dua kelompok besar mikroorganisme yang beroperasi dalam proses fermentasi bahan yaitu mikroorganisme pembentuk asam dan mikroorganisme pembentuk metana. Kedua mikroorganisme ini memiliki kemampuan duplikasi yang sangat berbeda yaitu 3 jam untuk mikroorganisme pembentuk asam dan 3 hari untuk mikroorganisme pembentuk metana. Pada kondisi yang lain, mikroorganisme pembentuk metana sangat peka terhadap tingkat keasaman atau sangat sensitif dengan pH rendah. Kondisi ini sangat kontradiksi karena pada kondisi beban umpan tinggi cenderung mempercepat proses pembentukan asam sehingga pH turun. pH rendah ini dapat mengganggu kinerja mikroorganisme pembentuk metana yang belum sempat berkembang (Padmono, 2007).

Alkalinitas merupakan banyaknya jumlah basa pada reaktor untuk menetralkan kondisi asam pada *digester* sehingga pH menjadi stabil (Teghammar et al., 2012). Adanya alkalinitas dalam *digester* pada konsentrasi tertentu dapat menjadi penyangga (*buffer*) supaya pH berada pada kondisi netral saat terjadi peningkatan asam, agar terjadi keseimbangan proses secara keseluruhan sehingga proses AD berjalan dengan normal. Apabila pH turun secara drastic dan dibiarkan tanpa penanganan maka proses AD dapat berhenti beroperasi akibat dari bakteri pembentuk metana yang mati (Padmono, 2007).

2.4.4. Rasio C/N

Rasio C/N menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi AD, dalam hal ini adalah mikroorganisme yang berfungsi dalam proses degradasi dan proses konversi bahan organik. Pada proses AD, rasio C/N optimal pada rentang 20-30 (Li et al., 2011). Rasio C/N yang terlampau tinggi pada bahan organik menyebabkan produktifitas gas metana menjadi rendah. Bahan dengan rasion C/N tinggi mengakibatkan kandungan nitrogen menjadi rendah. Kondisi tersebut menyebabkan konsumsi nitrogen yang cepat oleh bakteri metanogen dan

mengakibatkan produksi biogas menurun akibat kurangnya nitrogen yang tersedia sebagai fungsi bakteri tumbuh (Teghammar et al., 2010). Untuk meningkatkan kuantitas nitrogen, perlu ditambahkan bahan organik lain yang memiliki unsur nitrogen tinggi, sebagai contoh dapat memanfaatkan limbah kotoran ternak. Sementara itu, jika rasio C/N sangat rendah menyebabkan ammonia terakumulasi dan dapat menaikkan pH *digester* sebesar 8,5 yang bersifat racun terhadap bakteri metanogen (Teghammar et al., 2010). Bahan organik lain dengan kandungan karbon maupun serat yang tinggi perlu ditambahkan seperti rerumputan, jerami padi, sekam padi dan dedaunan. Caranya dengan mencampurkan bahan organik dengan bahan mengandung karbon hingga dicapai rasio C/N yang ditentukan. Berikut Tabel 2.6 tersaji rasio C/N yang terkandung pada beberapa bahan organik.

Tabel 2.6. Rasio C/N pada Berbagai Bahan Organik

Bahan baku	Rasio C/N
Kotoran Manusia	8
Kotoran bebek	8
Kotoran ayam	10
Kotoran Kambing	12
Kotoran babi	18
Kotoran domba	19
Kotoran sapi/kotoran kerbau	24
Eceng Gondok	25
Kotoran gajah	43
Jerami (jagung)	60
Jerami (padi)	70
Jerami (gandum)	90
Serbuk gergaji	diatas 200

(Saragih, 2010)

2.4.5. Kandungan *Total Solid* (TS)

Kandungan air merupakan salah satu parameter penting yang mempengaruhi proses AD, sehingga TS digunakan sebagai parameter AD yaitu: *wet digestion* atau L-AD dengan TS <15% dan *dry digestion* atau SS-AD dengan TS >15% (Motte et al., 2013). Konsentrasi TS memiliki pengaruh terhadap pH dan efektivitas mikroorganisme dalam proses AD (Boontian, 2014). Konsentrasi TS pada kondisi SS-AD berada pada rentang 20-30%. Konsentrasi TS >30% mengakibatkan penurunan pada produksi biogas sebesar 17% akibat dari adanya

akumulasi asam organik dan dapat menurunkan konversi bahan organik (Abbassi-Guendouz et al., 2013; Motte et al., 2013).

2.4.6. Feedstock dan Inokulum

Substrat (*feedstock*) dikonversi menjadi metana oleh bakteri anaerobik. Pertumbuhan bakteri pada proses *anaerobic digestion* dapat dilakukan dengan penambahan inokulum atau nutrisi. Hal ini dikarenakan mikroorganisme membutuhkan sumber energi untuk beraktivitas pada proses produksi biogas. Nutrien yang dibutuhkan berupa makronutrien seperti karbon, nitrogen, hidrogen, fosfor, kalium dan sulfur serta mikronutrien seperti besi, tembaga, nikel, molybdenum, tungsten, kobalt dan seng (Teghammar et al., 2012).

Rasio *feedstock* terhadap inokulum (F/I) merupakan parameter yang mempengaruhi sistem SS-AD baik dalam proses *batch* maupun kontinyu. Pada sistem SS-AD di skala industri rasio F/I sangat rendah untuk menghindari resiko kegagalan dan memaksimalkan kinetika reaksi (Motte et al., 2013). Rasio F/I yang digunakan pada sistem SS-AD berkisar antara 2-6 (Xu et al., 2013).

2.5. Hasil Samping Biogas

Biogas memang pilihan yang tepat untuk dijadikan sebagai energi alternatif. Selain murah, biogas juga sangat ramah lingkungan. Limbah yang dihasilkan selama proses produksi biogas juga masih dapat dimanfaatkan. Hasil samping biogas yang berupa lumpur atau yang lebih dikenal dengan sebutan *sludge* mengandung banyak unsur hara yang dapat dimanfaatkan menjadi pupuk untuk tanaman. Pupuk organik yang dihasilkan dari alat keluaran biogas sudah dapat digunakan dan berkualitas prima. Kandungan unsur haranya yang tinggi sehingga dapat meningkatkan kesuburan tanah dengan memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Proses pembuatan pupuk organik dengan memanfaatkan hasil keluaran biogas ini lebih efisien dibandingkan dengan pembuatan kompos yang memerlukan lahan yang lebih luas serta proses yang lebih lama. Selain itu, digester yang didesain kedap udara juga mengurangi tingkat kegagalan proses

dekomposisi sehingga pupuk organik yang dihasilkan berkualitas maksimal (Wahyuni, 2011).

Limbah padat sangat baik untuk pupuk karena proses kompos lebih sempurna daripada pupuk kandang yang ditumpuk diudara terbuka. Limbah yang dihasilkan oleh biogas pada saat ini masih sangat jarang dibuat menjadi produk yang bermanfaat, oleh sebab itu diperlukan teknologi pengomposan sebagai alternatif dari permasalahan limbah biogas. Serta dengan adanya teknologi pengomposan, teknologi ini dapat mengurangi penggunaan pupuk kimia sehingga dapat memperbaiki sifat fisik, kimia dan biologi tanah yang digunakan untuk pertanian dan perkebunan (Wisnu H et al., 2011). Lumpur yang keluar dari instalasi biogas terdiri dari dua komponen yaitu komponen padat dan cair (Junus, 1995). Lumpur yang berasal dari instalasi biogas sangat baik untuk dijadikan sebagai pupuk karena mengandung berbagai macam mineral yang dibutuhkan oleh tanaman, antara lain P, Mg, Ca, K, Cu, dan Zn (Peirce et al., 1997; Suzuki et al., 2001; Taniguchi et al., 2005).

Pupuk cair dari produk samping biogas dari limbah cair latex dengan penambahan substrat enceng gondok didapat nilai kandungan pupuk kompos cairnya sebesar N-total 0,026%, C-organik 0,87%, fosfor 0,033% dan kalium 0,423%. Sedangkan sampel yang ditambahkan substrat jerami padi didapat nilai kandungan pupuk kompos cairnya sebesar N-total 0,017%, C-organik 0,186%, fosfor 0,045%, dan kalium 0,358% dimana kondisi operasinya pH 7 dan suhu 28°C (Budiarto et al., 2014). Pada hasil samping biogas dari limbah cair pabrik kelapa sawit dengan aktivator kotoran sapi, optimum dengan perbandingan 9:1 untuk menghasilkan pupuk cair yang baik (Aminah et al., 2011).

2.6. Penentuan Laju Produksi Biogas

Energi biogas dihasilkan atas proses fermentasi materi organik oleh bakteri secara anaerobic tanpa oksigen. Reaksi biokimia di dalam digester sesuai dengan laju pertumbuhan bakteri anaerobik. Model mekanistik paling populer untuk kinetika enzim sederhana dikembangkan oleh L. Michaelis dan ML Menten pada tahun 1913. Kinetika reaksi katalis enzim sederhana sering disebut sebagai

kinetika Michaelis-Menten. Persamaan ini menjelaskan persamaan enzimatik antara substrat dan produk yang dihasilkan selama proses reaksi (Zainol & Ismail, 2019).

$$v = \frac{V_{max}[S]}{K_m + [S]} \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan:

- v = kecepatan reaksi
- V_{max} = tingkat maksimum yang dicapai oleh sistem
- $[S]$ = konsentrasi substrat S
- K_m = konstanta Michaelis

Model lain disampaikan oleh (Annuar et al., 2008) dimana model kinetika untuk laju pertumbuhan mikroorganisme dan biosintesis dapat dideskripsikan dengan baik menggunakan Model Tessier. Model ini memperhitungkan tingkat konsumsi oleh sel atau mikroorganisme dan terkait secara proporsional dengan tingkat pertumbuhan.

$$\mu = \mu_{max}[1 - exp(-K_s C_s)] \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan:

- μ = tingkat pertumbuhan spesifik
- μ_{max} = tingkat pertumbuhan spesifik maksimum
- C_s = konsentrasi substrat
- K_s = konstanta saturasi

SEKOLAH PASCASARJANA
 Pertumbuhan berbagai mikroorganisme seperti bakteri dan mikroalga dapat dilihat tren laju kinetika pertumbuhannya menggunakan Model Monod (See et al., 2018). Skema pertumbuhan bakteri dan mikroalga tersebut memiliki bentuk seperti yang tersaji pada Persamaan 2.3.

$$\mu = \frac{\mu_{max}S}{K_s + S} \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan:

- μ = tingkat pertumbuhan spesifik
- μ_{max} = tingkat pertumbuhan spesifik maksimum
- S = konsentrasi substrat
- K_s = konstanta saturasi

Model Gaussian dapat disimulasikan sebagai plot ascending dan descending. Persamaan Gaussian juga telah banyak digunakan untuk memodelkan laju kinetika biogas diantaranya oleh (S. Ahmed & Kazda, 2017; Choi et al., 2020; Shitophyta et al., 2021). Persamaan Gaussian tersaji pada Persamaan 2.4.

$$y = A. \exp \left[-0,5 \left(\frac{t - t_0}{b} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan:

- y = laju produksi biogas (mL/gram)
- t = waktu retensi hidrolis (hari)
- A = potensi produksi biogas (mL/gram)
- b = konstanta (hari)
- t_0 = waktu terjadinya laju produksi biogas maksimum (hari)

Pada studi terkait produksi biogas, juga digunakan Metode Taguchi dimana metode ini menggunakan susunan ortogonal untuk mengurangi jumlah eksperimen dan membatasi pengaruh parameter. Hal tersebut memberikan pendekatan yang sederhana, mahir, dan metodis untuk menunjukkan parameter optimal pada produksi biogas (Budiyono et al., 2021; Dhawane et al., 2016; Karabas, 2013). Fungsi kerugian merupakan strategi untuk menghitung deviasi antara nilai eksperimen dan nilai yang ditargetkan. Fungsi kerugian dinyatakan dalam nilai rasio *signal-to-noise* (S/N) (Kivak, 2014). Rasio S/N mempunyai tiga

karakteristik kualitas yaitu: semakin kecil semakin baik, semakin besar semakin baik, dan nominal terbaik.

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan:

- S/N = rasio *signal-to-noise*
- y_i = sinyal (hasil biogas)
- n = jumlah observasi percobaan

Apabila nilai laju produksi biogas di dalam biodigester dianggap sebanding dengan laju pertumbuhan spesifik mikroorganisme metanogenik, maka laju produksi biogas akan dapat mengikuti persamaan Gompertz (Nopharatana et al., 2007; Tuesorn et al., 2013). Persamaan tersebut merupakan model matematis untuk pengamatan *time series*, yaitu pertumbuhan yang paling lambat pada awal dan akhir periode waktu pengamatan (mengikuti skema pertumbuhan mikroorganisme) yang memiliki bentuk umum persamaan sebagai berikut.

$$P = A \cdot \exp \left\{ -\exp \left[\frac{U_e}{A} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan:

- P = produksi biogas kumulatif (liter)
- A = produksi biogas maksimum (liter)
- U = konstanta laju produksi biogas maksimum (liter/hari)
- λ = lama *lag phase* / waktu minimum terbentuknya biogas (hari)
- t = waktu kumulatif untuk produksi biogas (hari)
- e = bilangan Euler ($e = 2,71828\dots$)

Sejalan dengan persamaan Gompertz, persamaan lain yang dapat digunakan untuk penentuan laju produksi biogas adalah persamaan Logistic dan persamaan Transfert. Kedua persamaan ini menggunakan input data yang sama dengan persamaan Gompertz yaitu produktifitas biogas dan waktu pengamatan

(Roberts et al., 2023). Persamaan Logistic dan persamaan Transfert masing-masing tersaji pada Persamaan 2.7 dan Persamaan 2.8.

$$P = \frac{A}{\left[1 + \exp\left[\frac{4U_e}{A}(\lambda - t) + 2\right]\right]} \dots\dots\dots(2.7)$$

$$P = A \cdot \exp\left[-\exp\left[1 - \left(\frac{U_e}{A}\right)(\lambda - t)\right]\right] \dots\dots\dots(2.8)$$

2.7. Response Surface Methodology

Metode permukaan respon merupakan gabungan antara metode statistika dan matematika yang berfungsi untuk menentukan kondisi terbaik penelitian dengan menggunakan jumlah penelitian terendah untuk mendapatkan hasil yang layak (Sarrai et al., 2016). Dengan metode permukaan respon, peneliti dapat mencari suatu fungsi pendekatan yang sesuai untuk menentukan respon yang akan datang dan menentukan nilai dari variabel bebas yang menghasilkan respon optimum terhadap materi yang dipelajari. Pengembangan penelitian biogas menggunakan metode permukaan respon untuk mendapatkan kondisi operasi optimum pada berbagai variable. (Chong et al., 2023) melakukan optimasi dan evaluasi kinerja produksi biogas dari limbah industri kelapa sawit menggunakan *response surface methodology* (RSM), *artificial neural network* (ANN) dan *adaptive neuro-fuzzy inference system* (ANFIS). Penelitian lain dilakukan oleh (Habchi et al., 2023) yang melakukan penelitian terkait optimasi beban dan waktu retensi hidrolik menggunakan RSM pada produksi biogas dari limbah rumah potong unggas. Bochmann and Montgomery juga dikatakan bahwa metode permukaan respon bertujuan untuk mengoptimalkan respon materi yang diuji dari variabel bebas (Bochmann & Montgomery, 2013). Hubungan antara respon (y) dan variabel bebas (x) dapat dilihat dalam Persamaan 2.5.

$$Y = f(X1, X2, \dots, Xk) + \varepsilon \dots\dots\dots(2.9)$$

Keterangan:

Y = Variabel respon

X_i = Variabel bebas/faktor (i = 1,2,3,...,k)

ε = Error

Metode permukaan respon pada dasarnya terdiri atas tiga konsep besar, yaitu menunjukkan percobaan yang dirancang secara statistik, memperkirakan koefisien dalam model matematika dan memprediksikan respon serta memeriksa kelayakan model (Sadhukhan et al., 2016)(Sadhukhan et al., 2016). Rancangan percobaan (*Design of Experiments*) merupakan aspek penting dalam metode permukaan respon. Cara ini dikembangkan untuk percobaan fisik tetapi juga dapat digunakan untuk percobaan numerik.

2.7.1. *Central Composite Design*

Central composite design telah banyak digunakan dalam metode statistika berdasarkan model multivariansi nonlinear untuk optimasi variabel proses dan juga digunakan untuk menentukan persamaan regresi model dan kondisi operasi dari percobaan yang layak (Sadhukhan et al., 2016). Dalam (Chattoraj et al., 2013), CCD juga berfungsi untuk mempelajari interaksi dari pengaruh beberapa parameter terhadap proses. Penelitian biogas banyak menggunakan CCD untuk mendapatkan rancangan penelitian sesuai dengan variasi factorial yang ditetapkan. Penggunaan CCD dilakukan oleh (Adedeji et al., 2022) untuk melakukan optimasi produksi biogas dari kulit pisang dan air limbah menggunakan. (Kainthola et al., 2020) juga menggunakan CCD dalam penelitiannya terkait optimasi percepatan hasil metana dengan bahan baku campuran Jerami padi dan sisa makanan. Model empiris dikembangkan untuk menghubungkan respon dengan proses yang terjadi dan berdasarkan orde dua model kuadratik untuk menganalisis efek dari interaksi parameter (Chattoraj et al., 2013). Model empiris dapat dilihat pada persamaan 2.3 dibawah ini.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_{ii}^2 + \varepsilon$$

.....(2.10)

Keterangan:

Y	= Variabel respon
β_0	= Intercept
$\beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$	= Koefisien efek linear, interaksi ganda
x_i, x_j	= Variabel bebas
ε	= Error

CCD nilai variasi faktor yang akan diujikan dikodekan dengan -1, 0, dan 1. Menurut (Ikawati, 2005), penentuan nilai yang akan dikodekan sangat mempengaruhi ditemukannya nilai optimum dari faktor yang diuji. Data yang terkode 0 merupakan kode yang mewakili daya yang mendekati nilai optimum, menjadi sangat penting, karena pergeseran nilai dalam memprediksikan data dapat berpengaruh dengan tidak atau ditemukannya titik optimum.

2.8. Analisis Kelayakan Teknologi, Lingkungan, Sosial, dan Ekonomi Biogas

Analisis kelayakan teknologi dilakukan untuk memastikan digester anaerobik untuk produksi biogas beroperasi dengan baik. Kriteria kelayakan teknologi biogas ini adalah ketersediaan bahan baku untuk menjaga keberlanjutan proses produksi, keberhasilan pemanfaatan produk utama, dan produk samping (Wahyuni et al., 2011). Analisis kelayakan lingkungan juga menjadi salah satu aspek pengembangan agar terciptanya sebuah paradigma dan tujuan praktis berbasis ramah lingkungan (Muis et al., 2016). Sehingga dalam proses pengelolaan suatu objek tidak meninggalkan baik aspek lingkungan, sosial dan budaya, dan ekonomi yang berjalan di lingkup masyarakat (Kissinger, 2022). Aspek lingkungan menjadi kajian utama dalam menjalankan sebuah strategi pengelolaan karena kewajiban dan anjuran setiap pengelolaan harus mengutamakan kesehatan ekosistem di wilayah tersebut, sehingga dalam prosesnya keberlangsungan ekosistem tidak terganggu secara mutlak. Melalui kajian lingkungan inilah yang menjadi pencegah bagi manusia dalam merusak ekosistem alam. Kriteria kelayakan lingkungan menekankan pada sisi dampak

pada abiotik dan biotik dari adanya teknologi biogas berbasis limbah sekam padi. Faktor abiotik yang dapat terpengaruh secara mendasar antara lain air, tanah, dan udara dan faktor biotik adalah makhluk hidup (Haryanti & Martuti, 2020). Aspek sosial budaya menekankan pada kajian yang memberikan imbas pada paradigma positif masyarakat terhadap proyek yang dijalankan agar terpacu dalam menjalankan peran lingkungan. Pada bagian ini, kriteria social yang dibahas adalah kondisi kebiasaan masyarakat atau petani dalam praktik penanganan limbah sekam padi, penggunaan limbah sekam padi sebagai bahan baku biogas dan peran serta Masyarakat yang terlibat dalam penanganan biosigester. Aspek ekonomi menjadi sebuah pertimbangan dari keuntungan dalam menjalankan sebuah proyek sebagai hasil yang didapatkan. Hasil samping berupa pupuk organik padat untuk dianalisis kualitas dan kuantitasnya. Kelayakan ekonomi merupakan salah satu aspek penting untuk menentukan apakah sebuah teknologi layak dan tidaknya untuk diterapkan. Salah satu cara yang digunakan adalah memproyeksi aliran kas. Aliran kas dalam pengembangan biogas terdiri dari aliran kas masuk dan aliran kas keluar. Aliran kas masuk (*inflow*) berasal dari penerimaan harga biogas yang dihasilkan (disetarakan dengan harga elpiji) dan berasal dari penjualan pupuk organik padat. Arus kas keluar (*outflow*) berasal dari pengeluaran biaya investasi untuk pembangunan instalasi biogas dan biaya operasional. Selisih antara keduanya merupakan suatu keuntungan atau kerugian dari penerapan instalasi biogas. Dalam penelitian ini digunakan kriteria kelayakan usaha yang dibahas yaitu NPV, Nett B/C, dan *payback period*. Kriteria ini untuk melihat sejauh mana kelayakan pengembangan instalasi biogas digester plastik, jika masyarakat menggunakan modal dari Bank (Irsayad & Yanti, 2016).

NPV merupakan skema perbandingan antara nilai kas masuk bersih dengan nilai sekarang dari biaya yang dikeluarkan (Abdelhady, 2021). NPV menjadi salah satu analisis untuk menentukan kelayakan ekonomi suatu usaha jika perbandingan yang dihasilkan lebih dari 1. Berikut rumus yang digunakan dalam perhitungan NPV tersaji pada Persamaan 2.7 (Irsayad & Yanti, 2016).

$$NPV = \sum_t^n 1 \frac{Bt - Ct}{(1 + i)^t}$$

.....(2.11)

Keterangan:

- NPV = *Net present value* (Rp)
- B_t = Aliran kas masuk pada tahun ke-t (Rp)
- C_t = Aliran kas keluar pada tahun ke-t (Rp)
- t = Tahun ke-t
- i = Tingkat suku bunga (%/tahun)
- n = Umur ekonomi alat (tahun)

Rasio B/C ini juga merupakan metode yang dapat digunakan untuk mengetahui seberapa besar manfaat uang dapat diterima oleh usaha yang dijalankan pada setiap satuan rupiah biaya pengeluaran. Rumus yang digunakan untuk memperhitungkan nilai Rasio B/C (Irsayad & Yanti, 2016), dapat dilihat pada Persamaan 2.8.

$$\frac{B}{C} \text{ Ratio} = \frac{\sum_t^n = 1 \frac{B_t}{(1+i)^t}}{\sum_t^n = 1 \frac{C_t}{(1+i)^t}}$$

.....(2.12)

Keterangan:

- B_t = Aliran kas masuk pada tahun ke-t (Rp)
- C_t = Aliran kas keluar pada tahun ke-t (Rp)
- t = Tahun ke-t
- i = Tingkat suku bunga (%/tahun)
- n = Umur ekonomi alat (tahun)

PBP adalah waktu yang menunjukkan kecepatan keuntungan yang dihasilkan dapat kembali lagi dalam kurun waktu tertentu. Selain itu juga bisa disebut sebagai periode yang menunjukkan lama modal investasi untuk dapat kembali lagi. Jika nilai PBP ini semakin kecil dari nilai maksimum maka usaha tersebut dinilai layak untuk dilanjutkan. Rumus PBP tersebut dapat dilihat pada Persamaan 2.9 (Irsayad & Yanti, 2016).

$$PBP = \frac{I}{A} \dots\dots\dots(2.13)$$

Keterangan:

PBP = Jumlah waktu untuk pengembalian modal

I = Biaya investasi

A = Benefit tiap tahun



SEKOLAH PASCASARJANA