

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanaman Padi

Oryza sativa dan *Oryza glabberima* merupakan salah jenis padi domestikasi yang berasal dari Asia dan Afrika. Meskipun keduanya dapat hidup di tanah kering maupun tergenang, *Oryza sativa* lebih banyak diproduksi di 112 negara dan 90% diantaranya merupakan negara Asia. Nasi merupakan makanan pokok separuh populasi dunia sehingga padi merupakan tanaman yang sangat penting dengan produksi global mencapai 1000 Tg pada 2018. Sekitar 88% dari tanaman padi dikonsumsi oleh manusia dan 2,6% lainnya sebagai pakan hewan.

Limbah dari kegiatan penanaman padi (agrikultural) merupakan limbah dari tanaman dan kegiatan pertanian seperti sisa bagian tanaman di lahan pertanian setelah pemanenan sementara limbah agro-industrial merupakan hasil dari kegiatan penggilingan dan pembersihan bulir beras.

2.1.1 Karakteristik Sekam Padi

Sekam padi terutama terdiri dari tiga jenis komponen yaitu selulosa, hemiselulosa dan lignin. Sekam padi merupakan produk sampingan dari pengupasan biji berat dan memiliki berat sebesar 23% dari berat tanaman padi (Abaide, Dotto, et al., 2019; Abaide, Tres, et al., 2019; Kainthola et al., 2019b, 2019a; Matin & Hadiyanto, 2018; Pote et al., 2015). Lignoselulosa merupakan polimer kompleks yang tersusun atas ikatan kimia dan fisika antara hemiselulosa, selulosa dan lignin sehingga sulit untuk didekomposisi oleh bakteri anaerobik untuk menghasilkan biogas. Sebanyak 35-40% zat penyusun sekam padi adalah selulosa sedangkan hemiselulosa dan lignin menyusun sebanyak 25-40% dan 10-20% dari berat kering sekam padi. Selulosa dan hemiselulosa merupakan polimer organik yang diikat oleh lapisan luar yang tersusun dari lignin yang melindungi biomassa dari aktifitas bakteri. Selain lignin, sekam padi juga mengandung silika dalam kadar tinggi yang tercermin dari besarnya kandungan abu pada Tabel 2 (Imtiaz Anando dkk., 2023; Reddy dkk., 2024); silika membentuk lapisan pelindung pada permukaan sekam yang semakin menghambat akses enzim dan mikroba sehingga sekam padi bersifat rekalsitran dan memerlukan pre-treatment sebelum dapat dicerna secara anaerobik (Kaur, 2022).

Produksi gas metana dari biogas berbahan limbah pertanian dan perkebunan seperti bonggol jagung dan gabah 2-5 kali lebih banyak dibandingkan sampah dedaunan dan pepohonan (Brown et al., 2012).

Tabel 3 Karakteristik Limbah Padi (%)

	Sekam Padi	Jerami Padi
Selulosa	34.4	44.3
Hemiselulosa	29.3	35.5
Lignin	19.2	20.4
Analisis Proksimat (basis kering)		
Karbon	16.22	15.86
<i>Volatile matter</i>	63.52	65.47
Abu	20.26	18.67
Analisis Ultimat (basis kering)		
Karbon	38.53	38.24
Hidrogen	4.75	5.20
Oksigen	35.47	36.26
Nitrogen	0.52	0.87
Sulfur	0.05	0.18
<i>Higher heating value</i> (MJ/kg)	15.84	15.09

Sumber: (Díaz-Tovar et al., 2024; Ghatak & Mahanata, 2018; Olupot et al., 2016; Unrean et al., 2018)

2.1.2 Ketersediaan Limbah Sekam Padi dan Potensi Pemanfaatannya

Limbah dari kegiatan penanaman padi merupakan limbah dari tanaman dan kegiatan pertanian seperti sisa bagian tanaman di lahan pertanian setelah pemanenan, sementara limbah agro-industrial dihasilkan dari penggilingan dan pembersihan bulir beras. Limbah dari kegiatan pertanian dan penggilingan beras sebagian besar merupakan jerami dan sekam yang menyusun sebanyak 25-30% tanaman padi yang dipanen.

Dari sisi ketersediaan, sekam padi menyusun sekitar 20-23% bobot bulir padi sehingga jumlahnya melimpah seiring tingginya produksi padi, khususnya di kawasan Asia termasuk Indonesia sebagai salah satu produsen padi terbesar dunia (Imtiaz Anando dkk., 2023; Rianawati dkk., 2021). Ketersediaannya bersifat musiman mengikuti masa panen dan terkonsentrasi di sentra-sentra penggilingan padi. Sebagian besar sekam saat ini belum

dimanfaatkan secara optimal dan sering dibakar atau dibuang, sehingga ketersediaan yang besar namun belum termanfaatkan ini menjadikan sekam padi sebagai bahan baku yang menjanjikan untuk produksi biogas.

Jerami dan sekam padi yang dibuang dapat menimbulkan bahaya pada lingkungan dan ekosistem. Secara umum, jerami dan sekam padi dimanfaatkan sebagai pakan ternak, pupuk, penetasan, pupuk kandang, dibakar atau dimasukkan ke dalam tanah atau digunakan sebagai mulsa yang berpotensi menjadi sarang penyakit padi. Jerami padi dan sekam padi yang dibakar di tanah terbuka umum dilakukan oleh petani di seluruh dunia khususnya di negara-negara asia. Hal ini menyebabkan polusi dan emisi gas rumah kaca ke atmosfer sehingga meningkatkan pemanasan global.

Satu ton jerami padi yang dibakar menghasilkan 1515 kg karbon dioksida, 92 kg karbon monoksida, 3 kg partikulat, 2 kg sulfur dioksida, dan 3,83 kg nitrogen oksida yang dapat menyebabkan polusi udara yang parah dan mempengaruhi stratosfer. Indeks kualitas udara juga menurun pada masa panen padi di India. Rangkuman kriteria dan justifikasi pemilihan sekam padi sebagai substrat disajikan pada Tabel 3.

Tabel 4. Kriteria dan Justifikasi Pemilihan Sekam Padi sebagai Substrat

Kriteria	Kondisi Sekam Padi	Implikasi terhadap Penelitian
Ketersediaan dan keberlanjutan pasokan	Produksi padi nasional 2024 sekitar 53,14 juta ton GKG, menghasilkan sekitar 10–16 juta ton sekam per tahun yang terpusat di unit penggilingan	Pasokan bahan baku besar dan terkonsentrasi sehingga menjamin keberlanjutan umpan reaktor
Masalah lingkungan	Praktik penimbunan dan pembakaran terbuka melepaskan gas rumah kaca, partikulat, dan polutan udara	Pemanfaatan memberi manfaat ganda: energi terbarukan sekaligus pengurangan pencemaran
Karakteristik kimia	Kandungan lignoselulosa dan silika tinggi sehingga memerlukan pre-treatment	Selaras dengan fokus optimasi total solid dan grinding; menantang namun relevan
Titik agregasi	Terpusat di unit penggilingan padi	Logistik pengumpulan efisien dan membedakannya dari jerami yang tersebar di lahan
Nilai pemanfaatan eksisting	Masih rendah; sebagian besar dibakar atau dibuang	Tepat diposisikan sebagai residu berbeban lingkungan nol dalam kerangka ekonomi sirkular

2.2 Biogas

Biogas merupakan gas yang dihasilkan dari proses penguraian bahan organik dengan sistem anaerobik. Biogas umumnya terdiri dari 45-85% Metana (CH_4) dan 15-45% Karbon dioksida (CO_2). Terdapat gas Hidrogen sulfida (H_2S), Ammonia (NH_3) dan Nitrogen (N_2) dalam jumlah kecil. Biogas umumnya tersaturasi dengan uap air. Metana dan karbon dioksida merupakan gas tidak berbau (*odorless*), jika berbau kemungkinan besar karena adanya senyawa sulfur. Metana lebih ringan dari udara bebas sementara Karbon dioksida lebih berat. Hal ini dianggap sebagai keuntungan dari sudut pandang aspek keselamatan (Eriksson, 2010).

Banyaknya volume biogas yang dihasilkan umumnya ditulis dalam 'normal meter kubik' (Nm^3). Hal ini menunjukkan volume gas pada 0°C serta pada tekanan atmosfer. Energy yang dihasilkan dihitung dengan satuan Joule (J) atau watt hours (Wh). Metana murni memiliki nilai energi sebesar 9,81 kWh/ Nm^3 (9810 Wh/ Nm^3). Nilai energi biogas berkisar antara 4,5-8,5 kWh/ Nm^3 , bergantung pada jumlah relatif metana, karbon dioksida dan gas lain yang ada dalam biogas tersebut. Sehingga dapat dianggap bahwa biogas terdiri dari 60% metana dengan nilai energi kira-kira 6,0 kWh/ Nm^3 . Nilai energi pada biogas dibandingkan dengan jenis bahan bakar lain seperti pada gambar dibawah. Biogas dapat terbakar pada konsentrasi 5-20% di udara bergantung pada konsentrasi metana pada biogas.

Kualitas biogas yang dibutuhkan berbeda menurut pemanfaatannya. Untuk memasak, biogas mentah umumnya sudah memadai; untuk pembangkit listrik diperlukan penyisihan H_2S guna mencegah korosi; sedangkan untuk bahan bakar kendaraan atau injeksi ke jaringan gas diperlukan pemurnian (upgrading) hingga kadar metana mendekati gas alam. Teknologi upgrading yang umum meliputi water scrubbing, pressure swing adsorption, dan pemisahan membran untuk menghilangkan CO_2 dan H_2S sehingga dihasilkan biometana (Sahota dkk., 2018). Sebagai dasar konversi, biogas dengan kandungan metana sekitar 60% memiliki nilai energi kurang lebih 6,0 kWh/ Nm^3 atau setara sekitar 21,6 MJ/ Nm^3 , yang dapat digunakan untuk mengonversi volume biogas menjadi satuan energi listrik (kWh) maupun termal (MJ).

Teknologi biogas dengan proses anaerobik telah tercatat sejak empat abad yang lalu dan terus dikembangkan hingga saat ini. Pada awal perkembangannya biogas banyak diproduksi menggunakan bahan baku lignoselulosa. Perkembangan bahan baku untuk produksi biogas cukup signifikan hingga saat ini dengan menggunakan bahan baku lain seperti pupuk kandang, limbah pertanian, dan lumpur limbah.

1 Nm ³ biogas (97% metana) = 9,67 kWh
1 Nm ³ natural gas = 11.0 kWh
1 liter bensin = 9,06 kWh
1 liter diesel = 9,8 kWh
1 liter E85 = 6,6 kWh
1 Nm ³ biogas setara dengan 1,1 liter bensin
1 Nm ³ natural gas setara dengan 1,2 liter bensin

Gambar 1 Nilai Energi Biogas dibandingkan Jenis Bahan Bakar Lain

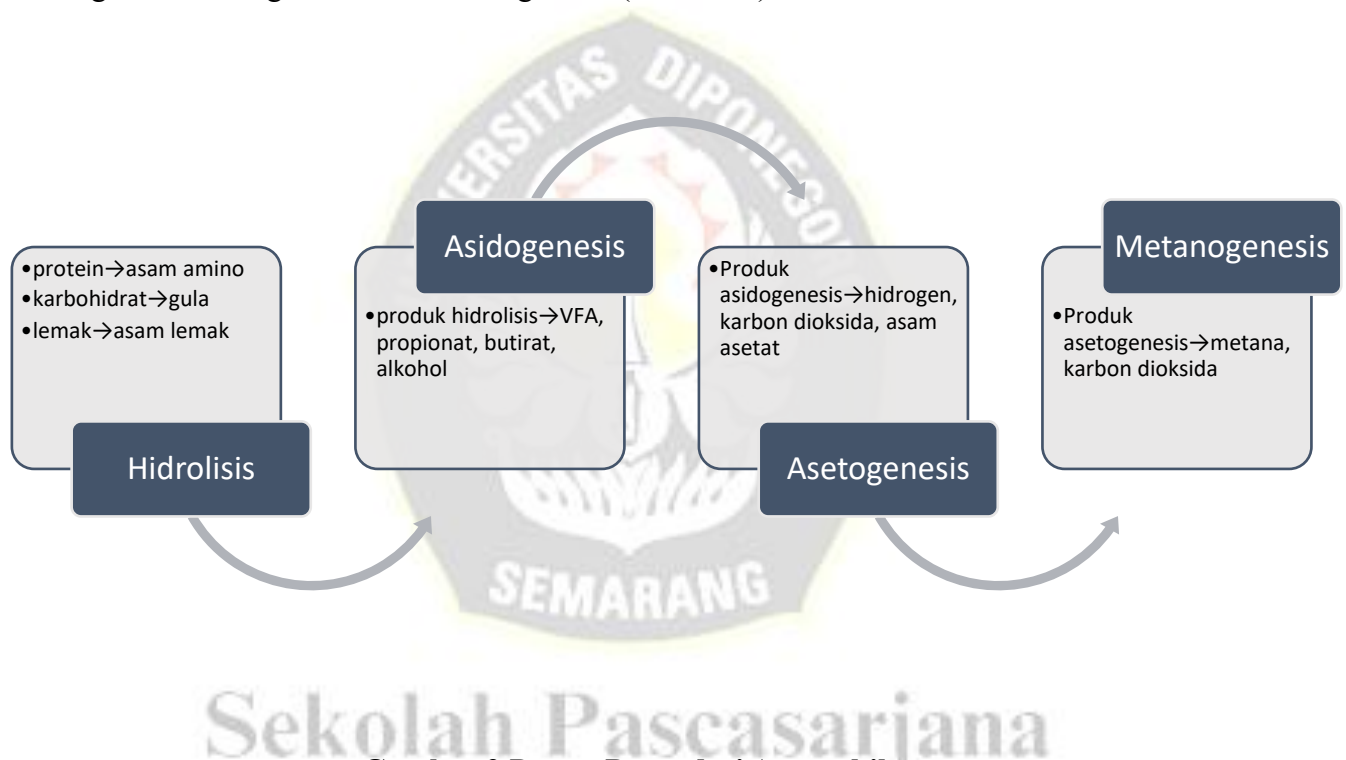
Sumber: Eriksson, 2010

Teknologi biogas telah digunakan sejak abad ke-19 terutama di India dan China sebagai negara pioner teknologi biogas. Umumnya biogas dihasilkan dari kotoran hewan ternak dan sisa makanan. Sejak tahun 1960-an Swedia memanfaatkan pengolahan air limbah domestik untuk menghasilkan biogas. Sedangkan di tahun 1970-an dan 1980-an sektor industri pemurnian gula dan industri kertas menggunakan proses anaerobik untuk pengolahan air limbah. Pada kurun waktu ini juga beberapa landfill mulai mengumpulkan dan memanfaatkan biogas yang dihasilkan dari fasilitas pengolahannya dan terus berkembang hingga pertengahan 1990. Beberapa pabrik biogas mulai banyak dibangun pada pertengahan 1990 untuk mengolah limbah industri makanan dan rumah jagal serta limbah dapur dari kegiatan domestik dan restoran. Berdasarkan klasifikasi *biofuel* limbah dari tanaman perkebunan dan pertanian termasuk kedalam *biofuel* generasi kedua. Konversi biokimia dari limbah tanaman perkebunan dan pertanian secara anaerobik dapat menjadi salah satu pilihan untuk meningkatkan bauran energi baru terbarukan pada bauran energi total negara (Kaur, 2022).

Di Indonesia pemanfaatan biogas antara lain didorong melalui program Biogas Rumah (BIRU) yang menyasar digester skala rumah tangga berbasis kotoran ternak. Meskipun demikian, pemanfaatan biogas dari limbah pertanian seperti sekam padi masih relatif terbatas dan pasarnya tergolong belum matang, sehingga membuka peluang pengembangan sekaligus menuntut dukungan teknologi dan kebijakan agar dapat berkontribusi pada target bauran energi terbarukan nasional (Rianawati dkk., 2021).

2.2.1 Produksi Biogas

Produksi biogas merupakan proses degradasi bahan organik secara anaerobik atau *anaerobic digestion*. *Anaerobic Digestion* (AD) merupakan proses biologi yang melibatkan mikroorganisme untuk mengubah bahan organik menjadi biogas tanpa kehadiran oksigen dalam system. Proses ini diperkirakan mampu menghasilkan CH₄ sebanyak 50-75%. Secara umum proses terbentuknya biogas merupakan hasil degradasi bahan organik dari substrat oleh aktivitas mikroorganisme. Adapun tahapan degradasi bahan organik tersebut yaitu hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis dan metanogenesis (Gambar 2).

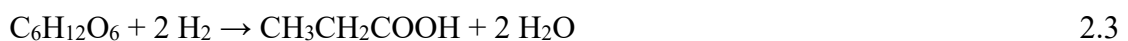
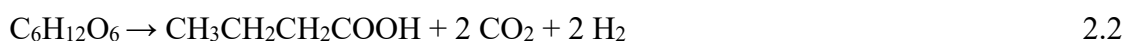


Gambar 2 Proses Degradasi Anaerobik

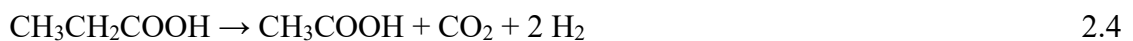
Reaksi hidrolisis:



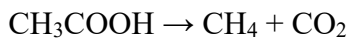
Reaksi asidogenesis:



Reaksi asetogenesis:



Reaksi metanogenesis:



2.6

Keempat tahapan tersebut berlangsung karena aktivitas bakteri anaerobik. Hidrolisis merupakan tahap awal degradasi dimana komponen organik seperti protein, karbohidrat dan lemak pada substrat akan dipecah oleh mikroorganisme menjadi asam amino, gula, asam lemak dan alkohol secara berturut-turut. Bahan organik yang telah dipecah pada proses hidrolisis selanjutnya akan diubah menjadi asam lemak volatile (VFA), rantai panjang asam lemak, propionate dan butirat oleh bakteri anaerob. Atom H^+ yang dihasilkan pada proses asidogenesis mungkin akan mempengaruhi nilai pH pada reaktor menjadi lebih asam. Produk dari asidogenesis selanjutnya akan dirombak di tahap asetogenesis menjadi hydrogen, karbon dioksida serta asam asetat. Pada tahap terakhir yaitu metanogenesis mulai dibentuk gas metana oleh bakteri metanogen. Proses degradasi anaerobik dikelompokkan kembali berdasarkan kandungan Total Solid pada substrat. Pengelompokkan AD dibedakan menjadi Liquid Anaerobic Digestion (L-AD) dengan total solid kurang dari 15% dan Solid State Anaerobic Digestion (SS-AD) dengan total solid $\geq 15\%$ (Brown et al., 2012; Kainthola et al., 2019a; Mustafa et al., 2017; Syafrudin et al., 2020).

2.3 Anaerobic Digestion (AD)

Proses pencernaan anaerobic merupakan biodegradasi senyawa organik yang menghasilkan produk berupa biogas. Pencernaan anaerobic dapat dilakukan oleh beberapa substrat seperti limbah padat perkotaan, sisa tanaman dan limbah pertanian, kotoran hewan, lumpur limbah, dan lain-lain. *Anaerobic Digestion* adalah proses mikrobiologi berkelanjutan, dalam tahapannya dibagi menjadi empat tahap yaitu hidrolisis, adisogenesis, asetogenesis dan metanogenesis. Setiap tahap dijalankan oleh kelompok mikroorganisme yang berbeda dan saling bergantung. Tahap hidrolisis dan asidogenesis didominasi oleh bakteri hidrolitik dan asidogenik yang memecah polimer kompleks menjadi gula sederhana, asam amino, dan asam lemak; tahap asetogenesis dijalankan oleh bakteri asetogenik penghasil hydrogen; sedangkan tahap metanogenesis dilakukan oleh arkea metanogen yang sensitif terhadap perubahan pH dan akumulasi asam lemak volatil (VFA). Pada substrat lignoselulosa seperti sekam padi, hidrolisis menjadi tahap pembatas laju (*rate-limiting step*) karena struktur lignin dan silika menghambat

akses enzim dan mikroba terhadap selulosa dan hemiselulosa, sehingga laju keseluruhan proses AD sangat ditentukan oleh efektivitas pembukaan struktur lignoselulosa melalui pre-treatment (Kainthola dkk., 2019a; Mussoline dkk., 2013).

Peran spesifik tiap kelompok mikroba pada keempat tahap tersebut, mulai dari bakteri hidrolitik dan fungi anaerob rumen hingga arkea metanogen, beserta fungsi dan implikasinya bagi degradasi sekam padi yang bermatriks silika-lignin, dirangkum pada Tabel 15. Tabel tersebut sekaligus menegaskan posisi hidrolisis sebagai tahap pembatas laju yang menjadi dasar pemilihan pretreatment dalam penelitian ini.

Tabel 5. Peran konsorsium mikroba per tahap anaerobic digestion dan implikasinya bagi sekam padi

Tahap	Kelompok/genus dominan	Fungsi utama	Implikasi bagi sekam padi
Hidrolisis (tahap pembatas)	Bakteri hidrolitik (<i>Clostridium</i> , <i>bacteroides</i> , <i>Ruminococcus</i> , <i>fibrobacter</i>) dan fungi anaerob rumen (<i>Neocallimastix</i> , <i>piromyces</i>)	Mensekresi selulase dan hemiselulase untuk memecah selulosa–hemiselulosa menjadi gula sederhana	Tahap pembatas laju: enkrustasi lignin–silika menghambat akses enzim, sehingga menuntut pretreatment (<i>grinding</i>) dan inokulum rumen
Asidogenesis	Bakteri asidogenik/fermentatif (<i>Clostridium</i> sp, <i>Bacillus</i> sp, <i>Lactobacillus</i> , <i>selenomonas</i>)	Mengubah monomer menjadi asam lemak volatil (asetat, propionat, butirat), H ₂ , dan CO ₂	Produksi VFA yang cepat dapat menurunkan pH pada TS tinggi; pengendalian rasio C/N dan kapasitas buffer L-AD menjadi penting
Asetogenesis	Bakteri asetogenik sintrofik (<i>Syntrophomonas</i> sp, <i>Syntrophobacter</i> sp, <i>Acetobacterium</i> sp)	Mengonversi VFA rantai panjang dan alkohol menjadi asetat, H ₂ , dan CO ₂ melalui transfer hidrogen antarspesies	Bergantung pada kemitraan dengan metanogen pemakan H ₂ ; akumulasi H ₂ /VFA dapat menghambat proses bila buffer lemah
Metanogenesis	Arkea metanogen asetoklastik (<i>Methanosaeta</i> sp, <i>Methanosarcina</i> sp) dan hidrogenotrofik (<i>Methanobacterium</i> sp, <i>Methanoculleus</i> sp)	Membentuk CH ₄ dari asetat serta dari H ₂ /CO ₂ ; menentukan yield metana akhir	Sangat sensitif terhadap pH dan suhu; dominansi <i>Methanosaeta</i> menandai jalur asetoklastik pada digester yang stabil

Sumber: Tamilselvan dan Immanuel Selwynraj (2024); Sahil dkk. (2023); Arelli dkk. (2024); Kainthola dkk. (2019)

2.3.1 Liquid Anaerobic Digestion (L-AD)

Metode LAD (liquid anaerobic digestion) atau wet anaerobic adalah metode pencernaan anaerobik yang digunakan untuk mengubah limbah organik yang memiliki kandungan solid (total solid) kurang dari 15%. *Liquid anaerobic digestion* atau yang dapat disebut sebagai fermentasi basah adalah proses fermentasi bahan organik yang membutuhkan kandungan bahan kering (TS) kurang dari 15% dan membutuhkan pembuburan bahan. Hal-hal yang harus diperhatikan di dalam proses fermentasi basah adalah pengadukan, pH, temperatur, posisi digester dan waktu retensi. Pengadukan sangat diperlukan agar produksi gas tidak terhalang oleh busa yang terbentuk di permukaan. *Wet anaerobic digestion* beroperasi pada kondisi konvensional sekitar 15% kandungan bahan kering. Beberapa teknologi reaktor ini telah berhasil untuk melakukan pencernaan anaerobik. Sebagian besar *wet anaerobic digestion* mikroorganismenya benar-benar tercampur dan tersuspensi dengan substrat di dalam digester. Berdasarkan kandungan *Total Solid* (TS), proses AD dibedakan menjadi L-AD yang beroperasi pada TS 0,5-15% dan SS-AD yang beroperasi pada TS lebih dari 15% (Li dkk., 2011). Studi komparatif menunjukkan bahwa *yield* metana L-AD dan SS-AD untuk umpan lignoselulosa relatif setara namun produktivitas volumetrik SS-AD dapat 2-7 kali lebih tinggi karena beban padatan yang lebih besar (Brown dkk., 2012). Sebaliknya L-AD unggul dalam kemudahan pengadukan, pencampuran substrat-inokulum yang lebih homogen, transfer massa yang lebih baik, kapasitas buffer yang lebih besar, serta pengendalian pH dan suhu yang lebih mudah, sehingga inhibitor seperti asam lemak volatil (VFA) lebih terencerkan dan risiko akumulasi asam secara lokal lebih rendah. Karakteristik ini menjadikan L-AD sesuai untuk substrat yang memerlukan pengenceran dan kontrol proses yang ketat seperti sekam padi dengan perlakuan pendahuluan.

Reaktor L-AD dapat dioperasikan secara batch maupun kontinu, dengan konfigurasi seperti *continuous stirred-tank reactor* (CSTR), *upflow anaerobic sludge blanket* (UASB), maupun *plug-flow*. Sistem *batch* dipilih dalam penelitian ini karena sesuai untuk studi skala laboratorium yang bertujuan mengevaluasi pengaruh variabel proses (kadar TS dan ukuran partikel) terhadap produksi biogas secara terkendali, memudahkan replikasi, serta

memungkinkan perhitungan potensi dan kinetika produksi biogas tanpa pengaruh laju pengumpanan (Syafrudin dkk., 2020; Nugraha dkk., 2020).

Kondisi L-AD memungkinkan kadar Total Solid dikendalikan sebagai variabel kontinu pada rentang rendah hingga 15%, rentang yang justru menjadi salah satu variabel optimasi inti penelitian ini. Sedangkan rezim SS-AD yang beroperasi di atas 15% tidak memberikan keleluasaan pengaturan tersebut. Secara operasional, fase cair memudahkan dispersi inokulum rumen, menjaga homogenitas campuran, dan menstabilkan transfer massa pada sekam padi yang bermatriks silika tinggi dan miskin air. Kemudahan inokulasi rumen serta pengadukan dan pemantauan pada fase cair juga selaras dengan praktik operasional skala desa yang menuntut kesederhanaan pengoperasian dan pengawasan proses. Pilihan ini tidak dimaksudkan sebagai klaim bahwa L-AD lebih unggul secara mutlak; pengakuan bahwa SS-AD memiliki produktivitas volumetrik lebih tinggi untuk substrat lignoselulosa (Brown dkk., 2012) tetap dipertahankan dan dijadikan salah satu arah penelitian lanjutan. Dalam konteks penelitian ini L-AD dipilih atas dasar kesesuaian dengan tujuan riset, bukan atas dasar keunggulan menyeluruh.

Fokus studi adalah mengoptimasi kadar Total Solid sebagai variabel kontinu; hanya rezim L-AD (TS 0,5–15%) yang memungkinkan TS divariasikan secara bertahap dan presisi sebagaimana dituntut desain *Central Composite Design*. Pre-treatment fisik yang menjadi variabel kedua (grinding dan pengayakan hingga 60 mesh) menghasilkan partikel halus yang memperbaiki keterbasahan (*wettability*) dan kemampuan pembuburan sekam padi yang semula bermatriks silika tinggi dan miskin air, sehingga umpan menjadi sesuai untuk sistem fase cair. Homogenitas dan transfer massa yang lebih baik pada L-AD diperlukan agar pengaruh kedua variabel proses terhadap kinetika produksi biogas dapat diisolasi dan dimodelkan secara andal tanpa bias gradien padatan lokal. Meskipun demikian, keunggulan produktivitas volumetrik SS-AD untuk biomassa lignoselulosa (Brown dkk., 2012) tetap diakui dan direkomendasikan sebagai pembanding pada penelitian lanjutan.

Tabel 6. Perbandingan SS-AD dan L-AD untuk substrat lignoselulosa berkadar silika tinggi

Aspek	SS-AD	L-AD	Kesesuaian dengan penelitian ini
Kadar TS operasi	> 15%	0,5–15%	L-AD; TS dijadikan variabel kontinu sesuai CCD
Transfer massa & pencampuran	Terbatas; gradien padatan lokal tinggi	Lebih baik; campuran homogen	Mendukung isolasi pengaruh variabel proses
Distribusi inokulum rumen	Kurang merata	Merata pada fase cair	Memudahkan inokulasi rumen
Kapasitas buffer & pengenceran VFA	Rendah; risiko akumulasi asam lokal	Lebih besar; inhibitor (VFA) terencerkan	Menstabilkan proses fermentasi
Produktivitas volumetrik	2–7× lebih tinggi	Lebih rendah	Keunggulan SS-AD; diakui sebagai arah penelitian lanjutan
Kontrol pH & suhu	Lebih sulit	Lebih mudah	Mendukung pemodelan kinetika yang andal
Kesesuaian sekam padi silika tinggi	Sesuai untuk padatan tinggi, tetapi sulit dioptimasi presisi	Sesuai setelah grinding dan pengenceran	Dipilih untuk penelitian ini
Praktik operasional skala desa	Pengadukan minimal; waktu retensi panjang	Pengadukan dan pemantauan sederhana	Selaras dengan operasi skala desa

Sumber: Li dkk. (2011), Brown dkk. (2012), Kainthola dkk. (2019), Syafrudin dkk. (2020); Tamilselvan dan Immanuel Selwynraj (2024)

2.4 Faktor yang Mempengaruhi Produksi Biogas

Produksi biogas terutama dengan system anaerobic digestion (AD) dipengaruhi oleh beberapa factor seperti temperature, pH dan rasio C/N. Perubahan pada factor-faktor tersebut dapat mengganggu produksi biogas baik secara kualitas maupun kuantitas.

Selain suhu, pH, dan rasio C/N yang diuraikan pada subbab berikut, terdapat sejumlah faktor operasional lain yang turut menentukan kinerja produksi biogas. *Hydraulic Retention Time* (HRT) dan *Organic Loading Rate* (OLR) memengaruhi keseimbangan antara laju penguraian substrat dan stabilitas digester. OLR yang terlalu tinggi dapat memicu akumulasi VFA dan menurunkan produksi biogas (Jabeen dkk., 2015; Li dkk., 2011). Pengadukan diperlukan untuk menjaga kontak substrat-mikroorganisme dan mencegah penumpukan busa di permukaan. Proses AD juga rentan terhadap senyawa penghambat (inhibitor) seperti amonia bebas, VFA, logam berat, dan senyawa fenolik. Sedangkan karakteristik serta rasio inokulum terhadap

substrat (*inoculum-to-substrate ratio*) memengaruhi lama fase lag dan kecepatan adaptasi mikroorganisme (Mussoline dkk., 2013).

Khusus untuk sekam padi, rasio C/N tergolong sangat tinggi, yaitu berkisar 55:1 hingga 87:1 (Olupot dkk., 2016), jauh di atas rentang optimum proses AD. Akibatnya, ketersediaan nitrogen menjadi faktor pembatas pertumbuhan mikroorganisme sehingga umumnya diperlukan strategi *co-digestion* dengan substrat kaya nitrogen atau penyesuaian rasio C/N untuk menjaga keseimbangan nutrisi dalam digester (Jabeen dkk., 2015; Okonkwo dkk., 2018).

2.4.1 Suhu

Proses tertentu dalam produksi biogas sangat ditentukan oleh temperature. Terdapat tiga temperature operasional reaktor dalam system AD yaitu psychrophilic, mesophilic dan thermophilic. Perbedaan temperature ini dipengaruhi oleh proses yang berlangsung serta jenis mikroorganisme yang terlibat dalam setiap prosesnya. Temperature optimum pada fase mesophilic yaitu 30-40°C sedangkan pada fase thermophilic sebesar 45-60°C. Namun literatur menunjukkan perbedaan mengenai suhu optimum: Mussoline dkk. (2013) melaporkan rentang mesofilik 35-40°C sebagai kondisi optimum untuk digesti jerami padi, sedangkan Ghatak & Mahanata (2018) menemukan produksi biogas cenderung meningkat pada suhu yang lebih tinggi (45-55°C). Perbedaan ini menunjukkan bahwa suhu optimum bersifat spesifik terhadap substrat dan komunitas mikroba; operasi termofilik berpotensi mempercepat laju proses, tetapi menuntut masukan energi pemanasan yang lebih besar sehingga kurang menguntungkan dari sisi neraca energi.

Proses produksi biogas akan terhambat apabila suhu turun hingga angka 20°C. Pada saat temperature reaktor mencapai 20°C maka mikroorganisme akan menghasilkan asam lemak yang berakibat pada penurunan nilai pH sehingga lingkungan didalam reaktor menjadi asam. Lingkungan yang asam dapat menghambat produksi biogas, mengurangi stabilitas system, serta kualitas effluent yang kurang baik (Ghatak & Mahanata, 2018; Kainthola et al., 2019a)(Kainthola et al., 2019b; Matin & Hadiyanto, 2018) .

2.4.2 pH dan kemampuan buffer

Nilai pH pada reaktor berpengaruh langsung pada produksi biogas. Asam organic yang banyak dihasilkan diawal proses dapat menurunkan nilai pH. Seiring berjalannya waktu nilai pH semakin meningkat hingga mencapai angka 7-7.2 sebagai pertanda bahwa produksi metana telah stabil. Selain itu penurunan nilai pH juga dapat menandakan tingginya produksi

karbondioksida dalam system. Pada rentang pH 4-7.2 berbagai mikroorganisme yang berbeda ditemukan. Kehadiran mikroorganisme bergantung pada kemampuan adaptasinya terhadap lingkungan reaktor biogas serta perannya dalam proses degradasi bahan organik (Kainthola et al., 2019a; Mussoline et al., 2013; Siddique & Wahid, 2018).

2.4.3 Rasio C/N

Nilai rasio C/N seperti yang tertulis bahwa nilai tersebut merepresentasikan kadar carbon organik berbanding nitrogen. Rasio C/N juga dapat menggambarkan tingginya pertumbuhan bakteri atau mikroorganisme dalam system biogas (Pan-In & Sukasem, 2017). Setiap bahan memiliki nilai rasio C/N yang berbeda-beda. Rasio C/N merupakan salah satu factor penting yang dapat mempengaruhi produksi biogas. Rasio C / N yang tidak tepat dapat menghasilkan jumlah total ammonianitrogen (TAN) yang tinggi dan/atau akumulasi VFA yang tinggi dalam digester. Baik TAN dan VFA adalah perantara penting dan penghambat potensial dalam proses AD (Li et al., 2011). Rasio C/N dapat disesuaikan dengan mencampurkan substrat dengan bahan lain sebelum proses produksi biogas berlangsung. Hal ini dikenal dengan istilah co-digestion (Jabeen et al., 2015; Okonkwo et al., 2018). Nilai optimum rasio C/N umumn(Hawali Abdul Matin & Hadiyanto, 2018; Okonkwo dkk., 2018; Syafrudin dkk., 2017).(Hawali Abdul Matin & Hadiyanto, 2018; Okonkwo et al., 2018; Syafrudin et al., 2017).

2.5 Pre-treatment dalam Produksi Biogas

Pre-treatment dalam proses produksi biogas umumnya dilakukan pada substrat yang memiliki kadar selulosa, hemiselulosa serta lignin yang tinggi. Proses dekomposisi lignoselulosa akan berjalan lambat karena ikatannya yang kuat. *Pre-treatment* memiliki titik tekan untuk memisahkan lignin dari struktur kompleksnya (Kainthola et al., 2019b). Terdapat beberapa jenis *pre-treatment* yang dapat dilakukan meliputi *pre-treatment* fisika, kimia, termofisika dan termo-kimia serta biologis seperti yang disajikan pada Tabel 6**Error! Reference source not found..** Setiap *pre-treatment* memiliki metode yang berbeda dan juga menghasilkan efek yang berbeda walaupun memiliki tujuan utama yang sama yaitu memutus rantai lignin dan selulosa. *Pre-treatment* fisika dapat meningkatkan luas permukaan dan mengurangi kadar air bahan. *Pretreatment* pada biomassa merupakan salah satu tahapan yang penting guna memutus rantai ikatan lignin sehingga mengurangi kristalinitas selulosa dan meningkatkan ketersediaan karbohidrat.

Tabel 7 Jenis Pre-treatment Bahan Biogas

No.	Jenis Pre-treatment	Metode	Pengaruh
1	Fisika	Reduksi ukuran untuk memutus struktur lignoselulosa.	Merubah derajat polimerisasi, meningkatkan luas permukaan, mengurangi kadar air bahan, dan mengurangi kristalinitas bahan.
2	Kimia	Menggunakan bahan kimia sebagai katalis dan memutus rantai lignoselulosa.	Dapat meningkatkan produksi biogas hingga $\geq 42\%$ dari control (tanpa <i>pretreatment</i> kimia).
3	Termo-fisika dan Termo-kimia	Pengondisian temperatur dan tekanan tinggi pada reaktor biogas.	Meningkatkan porositas dan mempercepat delignifikasi.
4	Biologis	Memanfaatkan mikroorganisme untuk memutus rantai lignoselulosa.	Jenis mikroorganisme tertentu dapat memutus ikatan lignoselulosa untuk meningkatkan hidrolisis enzimatik.

Sumber: Imtiaz Anando et al., 2023; Kasinath et al., 2021; Tamilselvan & Immanuel Selwynraj, 2024

Secara umum metode *pre-treatment* dikelompokkan menjadi empat kategori utama. Pre-treatment fisik mencakup penggilingan (*milling*), penghancuran (*grinding*), ekstrusi, dan ultrasonikasi yang bekerja dengan meningkatkan luas permukaan dan menurunkan kristalinitas selulosa. *Pre-treatment* kimia meliputi perlakuan asam, basa (alkali), oksidatif, dan organosolv yang melarutkan atau memodifikasi lignin. *Pre-treatment* biologis memanfaatkan jamur atau enzim ligninolitik yang ramah lingkungan tetapi memerlukan waktu lebih lama, sedangkan pre-treatment fisikokimia seperti *steam explosion*, *ammonia fiber expansion* (AFEX), dan *wet oxidation* menggabungkan efek termal, tekanan, dan kimia. Kombinasi beberapa metode juga umum diterapkan untuk meningkatkan efektivitas delignifikasi (Kainthola dkk., 2019b; Kasinath dkk., 2021).

Di antara metode tersebut, pengecilan ukuran partikel merupakan *pre-treatment* fisik yang paling sederhana dan hemat bahan kimia. Pengurangan ukuran partikel meningkatkan luas permukaan spesifik dan menurunkan derajat kristalinitas sehingga mempercepat hidrolisis, meskipun ukuran yang terlalu halus dapat meningkatkan kebutuhan energi penggilingan serta memicu pemadatan (*compaction*) (Kaur, 2022). Rentang ukuran partikel 0,5-4 mm yang

digunakan dalam penelitian ini dipilih untuk mencakup variasi dari ukuran kasar hingga halus sehingga pengaruh ukuran partikel terhadap *yield* dan laju produksi biogas dapat dievaluasi secara sistematis melalui rancangan percobaan. Selain memperbesar luas permukaan, penggilingan juga memperbaiki keterbasahan (*wettability*) dan kemampuan pembuburan sekam padi yang bermatriks silika tinggi dan miskin air sehingga umpan menjadi kompatibel dengan rezim cair L-AD; dengan demikian keterbatasan kadar padatan tinggi diatasi melalui rancangan pre-treatment, bukan menjadi alasan untuk menolak L-AD (lihat Subbab 2.3.1).

Selain pengaruhnya terhadap *yield*, intensitas *pre-treatment* juga menentukan kebutuhan energi dan penggunaan bahan kimia yang berimplikasi pada dampak lingkungan. Pertimbangan ini menjadi dasar bagi analisis daur hidup (*Life Cycle Assessment*) pada Bab V untuk membandingkan dampak lingkungan antarintensitas pre-treatment.

Keempat kategori pre-treatment tersebut memiliki kelebihan dan kekurangan yang saling bertukar (*trade-off*). *Pre-treatment* biologis paling ramah lingkungan tetapi berlangsung lambat; pre-treatment kimia umumnya paling efektif dan cepat namun menimbulkan biaya bahan kimia serta limbah; sedangkan pre-treatment fisik relatif sederhana dan mudah ditingkatkan skalanya tetapi intensif energi. Dengan demikian, tidak ada metode tunggal yang unggul pada semua aspek sehingga pemilihannya bergantung pada keseimbangan antara efektivitas, biaya, dampak lingkungan, dan skalabilitas, sebagaimana dirangkum pada tabel perbandingan berikut (Kainthola dkk., 2019b; Kasinath dkk., 2021).

Tabel 8. Perbandingan Metode Pre-treatment Lignoselulosa

Jenis Pre-treatment	Efektivitas	Biaya	Dampak Lingkungan	Skalabilitas
Fisik (penggilingan, grinding, ultrasonik)	Sedang	Rendah–sedang	Konsumsi energi tinggi	Tinggi
Kimia (asam, basa, oksidatif, organosolv)	Tinggi	Tinggi	Residu dan limbah bahan kimia	Sedang
Biologis (jamur, enzim ligninolitik)	Sedang	Rendah	Rendah (ramah lingkungan)	Rendah–sedang
Fisikokimia (steam explosion, AFEX, wet oxidation)	Tinggi	Tinggi	Konsumsi energi dan bahan kimia	Sedang

Sumber: Kainthola dkk., 2019b; Kasinath dkk., 2021

Beberapa bahan dengan kandungan lignin yang tinggi diperlukan perlakuan atau *pre-treatment* terlebih dahulu untuk meningkatkan produksi biogas. *Pre-treatment* dapat dilakukan secara (Ali dkk., 2016; Chitawo & Chimphango, 2017; Syafrudin dkk., 2018) atau (Ali et al., 2016; Chitawo & Chimphango, 2017; Syafrudin et al., 2018). Kulit *Theobroma cacao* dan kotoran unggas digunakan sebagai bahan untuk menghasilkan biogas menunjukkan bahwa *pre-treatment* menggunakan hydrogenperoksida dapat meningkatkan kelarutan serta lignin berkurang hingga 81% (Dahunsi et al., 2019). Pada penelitian yang berbeda, proses *pre-treatment* dilakukan pada bahan yang berbeda (kulit biji kopi) dengan hasil yang sama, yaitu pretreatment mampu memecah ikatan lignin dan meningkatkan produksi biogas (Santos et al., 2018).

2.6 Central Composite Design dan Response Surface Methodology

Central Composite Design (CCD) merupakan salah satu rancangan percobaan dalam RSM yang digunakan untuk membangun model kuadratik secara efisien. CCD terdiri dari tiga jenis titik yaitu titik faktorial, titik aksial, dan titik pusat. Kombinasi ketiga titik ini memungkinkan estimasi pengaruh linear, interaksi, dan kuadratik dalam satu desain percobaan (Montgomery, 2017). Sedangkan *Response Surface Methodology* (RSM) merupakan pendekatan statistik dan matematis yang digunakan untuk mempelajari hubungan antara beberapa variabel bebas dengan respon, serta untuk menentukan kondisi optimum dari suatu proses. Dalam penelitian biogas, metode ini sangat relevan karena proses anaerobic digestion bersifat kompleks dan tidak linear, sehingga hubungan antar variabel seperti total solid dan pretreatment tidak dapat dijelaskan hanya dengan analisis sederhana (Bezerra dkk., 2008).

Jumlah percobaan dalam CCD ditentukan berdasarkan jumlah faktor yang diteliti, sehingga tetap efisien namun mampu memberikan informasi yang lengkap mengenai respon sistem. Setelah itu percobaan dianalisa menggunakan model RSM dalam bentuk polinomial orde dua yang mencakup pengaruh linear, interaksi, dan kuadratik. Model ini memungkinkan peneliti untuk memahami arah pengaruh variabel sekaligus memprediksi kondisi optimum yang tidak selalu berada pada nilai ekstrem dari variabel yang diuji. Analisis dalam CCD-RSM dilakukan menggunakan regresi polinomial dan analisis varians (ANOVA). Parameter statistik yang umum digunakan meliputi nilai F, *p-value*, koefisien determinasi (R^2), *adjusted R^2*, *predicted R^2*, serta *lack of fit*. Parameter ini digunakan untuk menilai apakah model yang dihasilkan

signifikan dan mampu merepresentasikan data dengan baik (Rajewski dkk., 2021). Beberapa hal penting yang perlu diperhatikan dalam analisis CCD-RSM meliputi pemilihan rentang variabel, jumlah titik pusat, validasi model, serta interpretasi koefisien secara ilmiah. Pemilihan rentang variabel harus didasarkan pada literatur atau studi pendahuluan agar hasil optimasi tetap realistis.

Pada penelitian biogas, RSM banyak dipakai karena proses anaerobic digestion tidak bekerja secara linear sederhana. Perubahan nilai total solid, waktu retensi, suhu, pH, komposisi substrat, maupun pretreatment dapat menimbulkan respons yang melengkung atau berbentuk kuadratik. Dalam kondisi seperti ini, analisis satu faktor atau uji beda rata-rata biasa sering tidak cukup, karena hanya menunjukkan ada atau tidaknya perbedaan, tetapi belum mampu menggambarkan titik optimum dan interaksi antarvariabel. RSM justru dirancang untuk menjawab kebutuhan tersebut melalui penyusunan model regresi, biasanya model kuadratik orde dua. Pendekatan CCD-RSM telah banyak digunakan untuk mengoptimasi *yield* metana, produksi biogas kumulatif, maupun methane potential pada berbagai substrat. Studi-studi tersebut menunjukkan bahwa model kuadratik hasil RSM dapat memberikan kecocokan yang baik terhadap data eksperimental, selama rancangan percobaan, rentang faktor, dan evaluasi statistik dilakukan dengan benar. Metode ini bukan hanya kuat secara teoritis tetapi juga sudah terbukti aplikatif pada penelitian *anaerobic digestion*.

Dibandingkan pendekatan satu-faktor-pada-satu-waktu (*one-factor-at-a-time*/OFAT) yang tidak mampu menangkap interaksi antarvariabel dan memerlukan banyak percobaan, RSM mengevaluasi seluruh faktor secara simultan. Selain CCD rancangan permukaan respons lain yang umum digunakan adalah *Box-Behnken Design* dan *Doehlert Design* yang berbeda dalam jumlah titik dan cakupan ruang percobaan. Pada CCD titik faktorial dikodekan pada level -1 dan +1, titik pusat pada level 0, dan titik aksial pada jarak $\pm\alpha$ dari pusat; nilai α menentukan sifat rotatability desain sehingga ragam prediksi seragam ke segala arah dari titik pusat. Pengodean variabel ke dalam bentuk tak berdimensi (-1, 0, +1) ini memudahkan perbandingan besarnya pengaruh antarfaktor (Montgomery, 2017; Bezerra dkk., 2008).

Penerapan RSM-CCD pada produksi biogas dari sekam padi telah dilaporkan, antara lain oleh Nugraha dkk. (2020) dan Syafrudin dkk. (2020), yang menggunakan rancangan ini untuk mengoptimasi kondisi proses serta memperoleh kombinasi *total solid* dan faktor lain yang menghasilkan produksi biogas optimum. Studi-studi tersebut menunjukkan bahwa model

kuadratik RSM mampu memberikan prediksi yang baik pada substrat sekam padi, sehingga mendukung penggunaan pendekatan yang sama dalam penelitian ini. Dibandingkan metode statistik konvensional CCD-RSM memiliki keunggulan dalam mengevaluasi beberapa variabel secara simultan, mengidentifikasi interaksi antar variabel, serta menentukan kondisi optimum secara efisien. Metode ini juga memungkinkan visualisasi hubungan variabel melalui grafik kontur dan permukaan respon, sehingga mempermudah interpretasi hasil (Bezerra dkk., 2008).

2. 7 Laju Produksi Biogas

Model Gompertz merupakan model kinetika yang digunakan untuk menggambarkan produksi biogas secara kumulatif terhadap waktu. Model ini mampu merepresentasikan pola sigmoid yang umum terjadi pada sistem biologis seperti anaerobic digestion. 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 dkk., 2007). 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.

$$P = A \cdot \exp \left\{ -\exp \left[\frac{Ue}{A} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana:

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...)

Model Gompertz dipilih karena mampu menggambarkan seluruh fase produksi biogas secara lengkap. Model ini juga sensitif terhadap perubahan kondisi proses seperti variasi total solid dan pretreatment, sehingga cocok digunakan dalam penelitian ini. Dibandingkan model lain seperti model orde satu, model Gompertz memiliki keunggulan dalam menggambarkan fase lag dan dinamika produksi biogas secara lebih realistis. Selain itu, parameter model lebih mudah

diinterpretasikan dan sesuai dengan sistem biologis (Budiyono dkk., 2013). Dalam penelitian ini, model Gompertz digunakan untuk menganalisis pengaruh total solid dan pretreatment terhadap dinamika produksi biogas. Dengan pendekatan ini, analisis tidak hanya terbatas pada jumlah biogas, tetapi juga mencakup kecepatan produksi dan waktu adaptasi mikroorganisme. Selain model Gompertz termodifikasi, beberapa model kinetika lain juga umum digunakan untuk menggambarkan produksi biogas, antara lain model orde satu (*first-order*), model logistik, model *cone*, dan model *transference*. Model orde satu sederhana namun kurang mampu menggambarkan fase lag, sedangkan model logistik dan *transference* dapat menggambarkan pola sigmoid serupa Gompertz dengan asumsi yang berbeda. Pemilihan model yang tepat memerlukan perbandingan kuantitatif antarmodel terhadap data eksperimen.

Kesesuaian model dievaluasi menggunakan kriteria *goodness-of-fit* seperti koefisien determinasi (R^2), *root mean square error* (RMSE), dan *Akaike Information Criterion* (AIC). Studi komparatif yang membandingkan model Gompertz termodifikasi, logistik, dan *transference* melaporkan bahwa model Gompertz termodifikasi memberikan kecocokan terbaik dengan R^2 mencapai 0,987 dan RMSE terendah (Alharbi & Alkathami, 2024). Temuan ini mendukung pemilihan model Gompertz pada penelitian ini, sekaligus menegaskan perlunya membandingkan parameter kinetika (A , U_e , dan λ) hasil studi ini dengan nilai pada literatur untuk substrat lignoselulosa sejenis.

2.8 Life Cycle Assessment untuk Analisa Dampak Lingkungan

Life Cycle Assessment (LCA) merupakan metode yang digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari suatu produk atau sistem secara menyeluruh sepanjang siklus hidupnya. Pendekatan ini mencakup seluruh tahapan mulai dari pengambilan bahan baku, proses produksi, hingga pemanfaatan produk akhir. LCA menjadi penting dalam penelitian energi terbarukan karena tidak semua teknologi yang meningkatkan produksi energi secara langsung memberikan dampak lingkungan yang lebih baik.

Dalam penerapannya, LCA memerlukan penetapan unit fungsional sebagai dasar pembanding, misalnya per satuan energi biogas yang dihasilkan (per MJ) atau per satuan massa sekam padi yang diolah, serta metode alokasi apabila terdapat ko-produk seperti digestat. Kuantifikasi dampak umumnya dibantu perangkat lunak LCA seperti SimaPro atau openLCA dengan basis data inventaris seperti Ecoinvent. Sejumlah studi LCA pada sistem biogas dari limbah pertanian

melaporkan bahwa biogas memberikan *global warming potential* yang lebih rendah dibandingkan bahan bakar fosil, meskipun besarnya manfaat sangat dipengaruhi oleh kebutuhan energi proses dan kebocoran metana (Ahmadi Moghaddam dkk., 2015; Unrean dkk., 2018). Namun kajian yang secara khusus membandingkan intensitas *pre-treatment* terhadap dampak lingkungan biogas sekam padi masih terbatas, sehingga aspek ini menjadi salah satu kontribusi penelitian ini.

Pemilihan batas sistem dan kategori dampak menentukan kelengkapan kesimpulan LCA. Batas *gate-to-gate* yang berfokus pada proses produksi memudahkan analisis. Tetapi batasan tersebut tidak menangkap manfaat lingkungan bersih (*net benefit*) yang muncul ketika biogas menggantikan praktik konvensional pengelolaan sekam padi khususnya pembakaran terbuka, maupun kredit substitusi pupuk sintetis oleh digestate. Sehingga pendekatan *cradle-to-grave* dengan skenario pembandingan (*avoided burden*) merupakan pengembangan yang relevan. Pertimbangan metodologis ini menjadi dasar interpretasi hasil dan rekomendasi pengembangan pada Bab V.

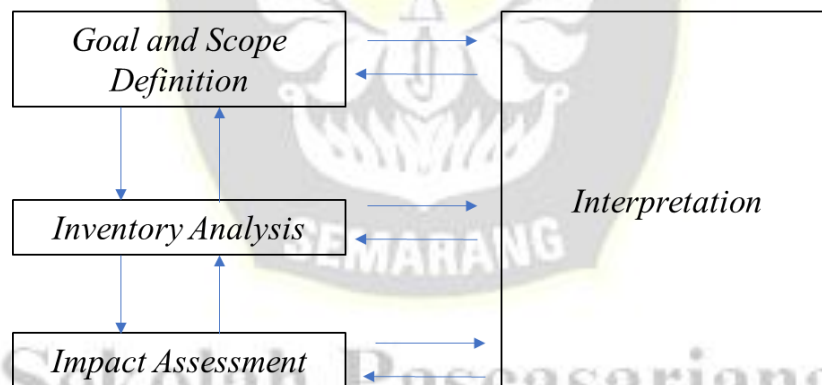
Menurut standar ISO 14040 dan ISO 14044, LCA terdiri dari empat tahapan utama yaitu:

1. Tahap pertama adalah penentuan tujuan dan ruang lingkup (*goal and scope definition*), yang menetapkan maksud studi, satuan fungsional (*functional unit*) sebagai dasar pembandingan, batas sistem (*system boundary*), kriteria cut-off, serta asumsi dan keterbatasan. Penetapan ini menentukan arah keseluruhan studi karena seluruh data dan interpretasi mengacu pada satuan fungsional dan batas sistem yang dipilih.
2. Tahap kedua adalah analisis inventori daur hidup (*life cycle inventory, LCI*), yaitu pengumpulan dan kuantifikasi seluruh aliran masukan dan keluaran sistem kebutuhan energi, bahan, air, serta emisi ke udara, air, dan tanah untuk setiap proses di dalam batas sistem. Data dapat bersumber dari pengukuran primer maupun basis data inventori sekunder seperti ecoinvent, dengan aliran limbah diperlakukan sebagai residu berbeban lingkungan nol (*zero burden*) sesuai prinsip alokasi limbah ISO 14044.
3. Tahap ketiga adalah penilaian dampak daur hidup (*life cycle impact assessment, LCIA*), yang mengklasifikasikan dan mengkarakterisasi data inventori menjadi indikator dampak lingkungan melalui faktor karakterisasi. Pada tahap inilah perangkat lunak LCA seperti SimaPro berperan sebagai alat bantu komputasi, bukan sebagai metode penilaian itu sendiri. Berbagai metode karakterisasi tersedia, seperti ReCiPe, CML, dan TRACI,

untuk menghasilkan profil dampak multi-kategori antara lain global warming potential, asidifikasi, dan eutrofikasi.

4. Tahap terakhir adalah interpretasi (*interpretation*), yang menautkan hasil inventori dan penilaian dampak dengan tujuan studi untuk menarik kesimpulan dan rekomendasi. Tahap ini mencakup identifikasi proses penyumbang dampak terbesar (*hotspot*) melalui analisis kontribusi, uji ketegaran hasil melalui analisis sensitivitas dengan memvariasikan parameter kunci sebesar $\pm 20\%$, serta evaluasi ketidakpastian kualitas data, sehingga simpulan yang ditarik dapat dipertanggungjawabkan.

Keempat tahapan tersebut tidak berlangsung secara linear, melainkan bersifat iteratif: temuan pada tahap interpretasi dapat mengarahkan peninjauan kembali terhadap tujuan, ruang lingkup, maupun data inventori pada tahap-tahap sebelumnya. Keterkaitan dan alur antartahap ini secara ringkas disajikan pada Gambar 4.



Gambar 3. Tahapan Utama dalam *Life Cycle Assessment*

Penentuan batas sistem merupakan salah satu aspek penting dalam LCA. Batas sistem dapat dipilih sesuai tujuan studi, misalnya difokuskan pada proses produksi inti. Pendekatan ini dikenal sebagai *gate-to-gate*, di mana analisis difokuskan pada proses utama. Untuk memperoleh gambaran yang utuh, evaluasi sebaiknya mencakup beberapa kategori dampak sekaligus agar profil terbaca multi-kategori dan tidak bersifat satu dimensi. Empat kategori inti yaitu Global Warming Potential, asidifikasi, eutrofikasi, dan konsumsi air merepresentasikan beban iklim, pengasaman, pengayaan nutrien, dan kebutuhan air proses. Sedangkan empat kategori tambahan pembentukan materi partikulat halus, pembentukan ozon fotokimia,

toksistas manusia, dan deplesi sumber daya fosil, menangkap dampak kesehatan dan penyusutan sumber daya yang umumnya luput pada penilaian satu indikator. Kategori dampak yang umum dievaluasi dalam LCA antara lain meliputi:

1. *Global Warming Potential* (GWP) untuk mengukur kontribusi terhadap perubahan iklim dalam satuan CO₂-eq.
2. *Acidification Potential* (AP) untuk menilai potensi pembentukan hujan asam akibat emisi SO₂ dan NO_x.
3. *Eutrophication Potential* (EP) untuk mengevaluasi dampak terhadap peningkatan nutrisi di perairan.
4. *Water Consumption* untuk mengukur konsumsi air bersih dalam proses produksi biogas, dinyatakan dalam satuan m³.
5. *Fine Particulate Matter Formation* (pembentukan materi partikulat halus) untuk menilai potensi pembentukan partikel halus PM_{2,5} yang berdampak pada kesehatan pernapasan, dinyatakan dalam kg PM_{2,5}-eq.
6. *Photochemical Ozone Formation* (pembentukan ozon fotokimia) untuk mengukur potensi pembentukan ozon troposferik akibat emisi NO_x dan senyawa organik volatil, dinyatakan dalam kg NO_x-eq.
7. *Human Toxicity* (toksisitas manusia) untuk mengevaluasi potensi dampak zat toksik terhadap kesehatan manusia, dinyatakan dalam kg 1,4-DCB.
8. *Fossil Resource Scarcity* (deplesi sumber daya fosil) untuk mengukur tingkat penyusutan cadangan bahan bakar fosil, dinyatakan dalam kg minyak-eq.

2.9 Analisis Kelayakan Ekonomi dan Ekonomi Sirkular

Aspek ekonomi menjadi sebuah pertimbangan dari keuntungan dalam menjalankan sebuah proyek sebagai hasil yang didapatkan. Pendapatan berasal dari produk yang dihasilkan yaitu biogas pupuk organik cair dan padat. Kelayakan ekonomi merupakan salah satu aspek penting dalam menentukan apakah sebuah proyek layak dan tidak layak untuk dilaksanakan. Dalam perencanaan ini analisis kelayakan ekonomi dilihat dari aspek biaya yang mencakup biaya pengembangan, biaya pendapatan, dan biaya operasional. Dari penjabaran pembiayaan tersebut dianalisis kelayakan ekonomi dengan menghitung Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), dan Benefit Cost Ratio (BCR).

Selain ketiga indikator tersebut, kelayakan ekonomi juga dapat dinilai melalui *Payback Period* (PBP) dan *Levelized Cost of Energy* (LCOE). PBP menunjukkan lamanya waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan investasi awal dari arus kas bersih. Semakin pendek PBP, semakin menarik proyek. LCOE menggambarkan biaya rata-rata produksi energi per satuan (misalnya Rp/kWh) sepanjang umur proyek sehingga memudahkan perbandingan dengan harga energi konvensional. Komponen biaya proyek biogas terdiri atas biaya investasi (CAPEX) seperti reaktor/digester, peralatan *pre-treatment*, dan unit penyimpanan gas, serta biaya operasional (OPEX) seperti bahan baku, tenaga kerja, pemeliharaan, dan utilitas. Adapun aliran pendapatan dapat berasal dari penjualan energi (biogas atau listrik), penjualan digestat sebagai pupuk organik, serta potensi kredit karbon.

Beberapa studi menunjukkan bahwa pemanfaatan sekam padi untuk energi dapat layak secara ekonomi pada kondisi tertentu, meskipun kelayakannya sensitif terhadap harga energi dan biaya investasi (Ali dkk., 2016; Chitawo & Chimphango, 2017). Dukungan kebijakan seperti feed-in tariff, subsidi, maupun insentif pajak berperan penting dalam meningkatkan kelayakan ekonomi proyek biogas, khususnya pada skala kecil di negara berkembang.

Penilaian kelayakan ekonomi sistem pengolahan limbah pertanian perlu ditempatkan dalam kerangka ekonomi sirkular (*circular economy*), yaitu model ekonomi yang menggantikan pola linear ambil-pakai-buang dengan penutupan loop material dan energi melalui penggunaan ulang, daur ulang, dan pemulihan sumber daya (Geissdoerfer dkk., 2017; Kirchherr dkk., 2017). Dalam kerangka ini, limbah tidak diperlakukan sebagai beban akhir melainkan sebagai bahan baku sekunder (*secondary raw material*) yang dapat divalorisasi menjadi produk bernilai. Pada sistem *Liquid Anaerobic Digestion* sekam padi, prinsip tersebut terwujud melalui konversi limbah sekam menjadi dua aliran nilai, yaitu biogas sebagai energi dan digestat sebagai pupuk organik cair yang mengembalikan unsur hara nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) ke lahan pertanian, sehingga menutup siklus hara yang pada praktik konvensional terputus. Konsekuensinya kelayakan ekonomi teknologi valorisasi limbah sebaiknya dinilai dari nilai pemulihan total seluruh aliran produk beserta beban lingkungan yang terhindar, bukan semata dari penjualan energi. Kerangka inilah yang menjadi dasar pembingkai analisis kelayakan ekonomi pada Subbab 4.3.6 dan 5.5.

NPV (Net Present Value) 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 (Irsayad & Yanti,2016).

$$NPV = \sum_t^n 1 \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t} \quad (4.3)$$

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)

BCR (Benefit Cost Ratio) merupakan metode yang dapat digunakan untuk mengetahui seberapa besar manfaat uang yang dapat diterima oleh usaha yang dijalankan pada setiap satuan rupiah biaya pengeluaran. Pada perhitungan BCR, suatu proyek dapat dilaksanakan apabila nilai $BCR > 1$. Rumus yang digunakan untuk memperhitungkan nilai BCR (Irsyad & Yanti, 2016), dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$BCR = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}} \quad (4.4)$$

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)

IRR (Internal Rate of Return) merupakan suku bunga yang diperoleh jika BCR bernilai sama dengan 1 atau nilai suku bunga yang diperoleh jika NPV bernilai sama dengan 0 (nol). IRR dihitung atas dasar pendapatan pertahun bersih dan total investasi yang diperlukan. Perhitungan IRR dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$IRR = \sum_{t=1}^n \frac{(B_t - C_t)}{(1+i)^t} \quad (4.5)$$

Keterangan:

Bt = Aliran kas masuk pada tahun ke- t (Rp)

Ct = Aliran kas keluar pada tahun ke- t (Rp)

$1/(1+i)^t$ = Rumus PV (Present Value)

t = Tahun ke- t

i = Tingkat suku bunga (%tahun)

n = Umur ekonomi alat (tahun)

2.10 Kebijakan Energi dan Lingkungan di Indonesia

Sebagai respon terhadap permasalahan lingkungan terkait perubahan iklim, dunia internasional menyepakati Persetujuan Paris 2015 pada Konferensi Perubahan Iklim Perserikatan Bangsa - Bangsa (UNFCCC) di Paris tahun 2015. Kesepakatan ini bertujuan untuk membatasi kenaikan suhu global di bawah 2°C , dengan target menahan kenaikan tersebut hingga $1,5^{\circ}\text{C}$ dibandingkan dengan tingkat pra-industri. Persetujuan Paris juga mendorong negara-negara untuk menetapkan dan melaksanakan kontribusi nasional yang ditentukan secara sukarela *Nationally Determined Contributions* (NDC) guna mengurangi emisi GRK. Indonesia menunjukkan komitmennya terhadap Persetujuan Paris dengan meratifikasinya melalui Undang-Undang Nomor 16 Tahun 2016. Melalui undang-undang ini, Indonesia berkomitmen untuk menurunkan emisi GRK sebesar 29% dengan usaha sendiri, atau hingga 41% dengan dukungan internasional, pada tahun 2030. Salah satu penyumbang emisi GRK di Indonesia berasal dari proses pembakaran bahan bakar konvensional yang digunakan sebagai sumber energi pada berbagai sektor.

Indonesia sebagai negara dengan populasi terbesar keempat di dunia dan ekonomi terbesar ke-16, konsumsi energi Indonesia terus meningkat seiring dengan kebutuhan pembangunan. Namun, ketergantungan terhadap bahan bakar fosil masih mendominasi sektor energi, sementara cadangan minyak dan gas terus menurun, diperkirakan hanya tersisa 0,3% dan 2% pada tahun 2060 (Khristanto, 2024). Kondisi ini menuntut Indonesia untuk beralih ke sumber energi yang lebih berkelanjutan. Menurut proyeksi Badan Energi Dunia (International Energy Agency-IEA), hingga tahun 2030 permintaan energi dunia meningkat sebesar 45% atau rata-rata mengalami peningkatan sebesar 1,6% per tahun. Sebagian besar atau sekitar 80% kebutuhan energi dunia tersebut dipasok dari bahan bakar fosil. Menurut data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) pemanfaatan gas bumi meningkat sebesar 3%

seiring dengan peningkatan populasi dan perekonomian yang lebih baik. Kegiatan ekonomi dan dinamika sosial masyarakat perlu didukung dengan ketersediaan energi yang lebih baik. Berdasarkan PP No. 79 Tahun 2014 terkait Kebijakan Energi Nasional, pemenuhan penyediaan energi dan pemanfaatan energi pada tahun 2025 dituntut untuk mewujudkan ketahanan energi dengan diperolehnya energi yang bersumber dari minyak bumi kurang dari 25%, batu bara minimal 30%, gas bumi minimal 22%, dan energi baru dan energi terbarukan paling sedikit 23% dan 31% pada tahun 2050. Ketentuan tersebut kini telah dicabut dan digantikan oleh PP No. 40 Tahun 2025 tentang Kebijakan Energi Nasional yang ditetapkan pada 15 September 2025, yang menggeser target bauran energi baru dan terbarukan menjadi sekitar 19–23% pada tahun 2030 dan meningkat bertahap hingga 70–72% pada tahun 2060, sementara realisasi bauran EBT pada pertengahan 2025 baru mencapai sekitar 16%.

Target tersebut dijabarkan lebih lanjut dalam Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) melalui Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017 yang kini diselaraskan kembali dengan PP No. 40 Tahun 2025 sebagai kerangka Kebijakan Energi Nasional yang berlaku — serta dengan Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN), yang menetapkan peningkatan porsi energi baru dan terbarukan dalam bauran energi nasional. Pemanfaatan biogas dari limbah pertanian sejalan dengan arah kebijakan ini karena mengonversi limbah menjadi energi terbarukan sekaligus mengurangi emisi GRK.

Dari sisi pengelolaan limbah, pemanfaatan sekam padi untuk biogas juga mendukung amanat Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah dan Peraturan Pemerintah Nomor 81 Tahun 2012, yang mendorong pengurangan dan pemanfaatan kembali limbah. Dengan demikian, produksi biogas dari sekam padi berkontribusi pada dua agenda kebijakan sekaligus, yaitu transisi energi dan pengelolaan limbah berkelanjutan.

Meskipun kerangka kebijakan telah tersedia, implementasinya masih menghadapi sejumlah tantangan, antara lain keterbatasan insentif ekonomi, kesenjangan teknologi, dan rendahnya tingkat adopsi di masyarakat. Penelitian ini diharapkan memberikan dasar teknis dan ekonomi yang memperkuat rekomendasi kebijakan bagi pengembangan biogas sekam padi di Indonesia.

2.11 Sintesis dan Identifikasi Celah Penelitian

Kajian pustaka pada subbab-subbab sebelumnya menunjukkan beberapa hal yang telah mapan dalam pemanfaatan biomassa lignoselulosa untuk produksi biogas. Pertama, sekam padi

tersedia melimpah sebagai limbah agro-industri namun bersifat rekalsitran karena tingginya kandungan lignin dan silika yang melindungi selulosa dan hemiselulosa dari degradasi mikroba. Kedua, proses anaerobic digestion telah dipahami berlangsung melalui empat tahap (hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, dan metanogenesis), dengan hidrolisis sebagai tahap pembatas laju (rate-limiting step) untuk substrat lignoselulosa. Ketiga, pre-treatment, khususnya secara fisik melalui pengecilan ukuran partikel, terbukti meningkatkan luas permukaan dan menurunkan kristalinitas sehingga mempercepat hidrolisis dan meningkatkan yield biogas (Brown dkk., 2012; Kainthola dkk., 2019a; Mussoline dkk., 2013).

Tabel 8 menempatkan sepuluh studi terdahulu pada baris dan enam dimensi kajian pada kolom, yaitu bahan baku dan pretreatment, kondisi sistem AD, optimasi sistem, kinetika produksi biogas, metode analisis dampak lingkungan, serta analisis ekonomi. Isi tiap sel menunjukkan apakah suatu dimensi dicakup atau tidak oleh studi yang bersangkutan. Pola yang terbentuk memperlihatkan bahwa tidak satu pun studi terdahulu mencakup keenam dimensi secara utuh. Penilaian dampak lingkungan merupakan kekosongan yang paling konsisten karena seluruh studi terdahulu tidak melakukannya, sedangkan analisis ekonomi hanya muncul pada sebagian kecil studi dan jarang berupa analisis tekno-ekonomi yang terkuantifikasi, misalnya Arelli dkk. (2024) yang melaporkan pendapatan bersih dan payback period. Studi yang menonjol pada optimasi proses berbasis Response Surface Methodology, seperti Sathish & Vivekanandan (2014) dan Safari dkk. (2018), justru tidak disertai penilaian dampak lingkungan maupun analisis kelayakan ekonomi. Sebaliknya baris Lantasi (2026) yang merepresentasikan penelitian ini menjadi satu-satunya yang terisi penuh pada keenam dimensi, mulai dari sekam padi dengan pre-treatment grinding dan pengayakan, sistem L-AD pada kadar Total Solid 7-14%, optimasi Response Surface Methodology, pemodelan kinetika Gompertz termodifikasi, penilaian Life Cycle Assessment, hingga analisis kelayakan ekonomi melalui NPV, BCR, dan IRR. Kekosongan sel pada studi terdahulu itulah celah penelitian yang diisi oleh disertasi ini, sekaligus memperkuat secara visual pernyataan kebaruan yang telah diuraikan sebelumnya.

Penelitian ini diposisikan untuk menjawab keempat celah tersebut secara terpadu, yaitu dengan mengoptimasi kondisi L-AD sekam padi menggunakan RSM-CCD, memodelkan kinetika produksinya dengan model Gompertz, serta mengevaluasi dampak lingkungan dan kelayakan ekonominya melalui LCA dan analisis tekno-ekonomi. Kerangka teori dan kerangka konsep yang menjadi landasan keterpaduan tersebut diuraikan lebih lanjut pada Bab III.

Dengan demikian, sekam padi dipilih sebagai substrat bukan semata karena ketersediaannya yang melimpah, melainkan karena secara simultan memenuhi kriteria pemilihan substrat sekaligus mengisi celah penelitian. Kriteria tersebut mencakup ketersediaan dan keberlanjutan pasokan yang terpusat di unit penggilingan, beban lingkungan nyata akibat praktik penimbunan dan pembakaran terbuka, serta karakteristik lignoselulosa-silika yang khas dan menantang sehingga selaras dengan fokus optimasi total solid dan grinding. Pemilihan ini juga membedakan sekam dari residu padi lain seperti jerami, karena titik agregasinya terpusat di penggilingan dan nilai pemanfaatan eksistingnya masih rendah, sehingga sekam tepat diposisikan sebagai bahan residu berbeban lingkungan nol yang dialihkan dari pembakaran menjadi bahan baku energi dan biopupuk dalam kerangka ekonomi sirkular.

Selain itu, kajian terdahulu cenderung berhenti pada tahap optimasi atau kinetika dan jarang menaikkannya dengan penilaian keberlanjutan, sementara penelitian ini merangkai optimasi statistik, pemodelan kinetika, LCA, dan analisis ekonomi dalam satu kerangka tertutup untuk satu objek. Lapis ketiga, dan yang paling membedakan, adalah temuan terkuantifikasi bahwa nilai keberlanjutan sistem justru bertumpu pada digestate alih-alih pada energi biogas—suatu inversi terhadap asumsi umum dalam literatur sekaligus dasar reposisi sistem sebagai model bioenergi terdesentralisasi berbasis ekonomi sirkular bagi limbah pertanian sekam padi di sentra produksi padi Jawa Tengah.

Sekolah Pascasarjana

Tabel 9. Matriks Celah Penelitian

Studi Terdahulu	Bahan Baku; Pretreatment	Kondisi Sistem AD	Optimasi Sistem	Kinetika Produksi Biogas	Metode Analisis Dampak Lingkungan	Analisis Ekonomi
Sathish & Vivekanandan (2014)	Jerami padi; digester floating drum, kondisi termofilik	L-AD (floating drum digester)	Response Surface Methodology (RSM) dengan Central Composite Design (CCD)	Persamaan regresi polinomial orde kedua	Tidak ada metode analisis dampak lingkungan	Hasil maksimal 0,72 m ³ melalui optimalisasi parameter (tanpa analisis biaya eksplisit)
Safari dkk. (2018)	Residu kanola dan kotoran sapi; batch, mesofilik (40,36 °C) dan termofilik (52,49 °C)	L-AD (batch basah)	Response Surface Methodology (RSM) dengan desain Box-Behnken	Model polinomial orde kedua ($R^2 = 0,9983$)	Tidak ada metode analisis dampak lingkungan	Analisis keseimbangan energi (Net Energy Gain); kondisi mesofilik lebih efisien
Shukla dkk. (2022)	Sekam padi (RH); konversi termokimia menjadi syngas (bukan AD)	Lainnya (gasifikasi/pirolisis, bukan AD)	Penggunaan abu dasar batubara sebagai katalis	Pemodelan kinetika untuk produksi syngas	Tidak ada metode analisis dampak lingkungan	Studi perbandingan biaya penggunaan katalis abu limbah
Hassan dkk. (2023)	Sekam gandum; batch, mesofilik (37 °C)	L-AD (batch basah)	Tidak disebutkan	Potensi metana biokimia (Biochemical Methane Potential/BMP)	Tidak ada metode analisis dampak lingkungan	Tidak dilakukan analisis ekonomi

Studi Terdahulu	Bahan Baku; Pretreatment	Kondisi Sistem AD	Optimasi Sistem	Kinetika Produksi Biogas	Metode Analisis Dampak Lingkungan	Analisis Ekonomi
Sabeeh dkk. (2020)	Jerami padi; batch, mesofilik (37 °C) dengan pra-perlakuan NaOH dan TiO ₂	L-AD (batch basah)	Optimasi dosis NaOH (1,5% w/v) dan TiO ₂ (0,25 g/L)	Model Gompertz termodifikasi	Tidak ada metode analisis dampak lingkungan	Layak secara ekonomi dibandingkan metode fisikokimia lainnya
Syafrudin, Dwi Nugraha, dkk. (2020)	Sekam padi; pengaruh ukuran gilingan partikel	L-AD (Liquid Anaerobic Digestion – eksplisit)	Variasi pengaruh ukuran gilingan partikel	Model Gompertz termodifikasi	Tidak dilakukan analisis dampak lingkungan	Tidak dilakukan analisis ekonomi
Pal dkk. (2022)	Jerami padi dan kotoran sapi; batch, mesofilik (40 °C), ko-digesti rasio 1:2	L-AD (batch basah)	Optimasi rasio ko-digesti (1:2)	Metode model-free iso-conversional (KAS, FWO, Starink)	Tidak dilakukan analisis dampak lingkungan	Tidak dilakukan analisis ekonomi
Arelli dkk. (2024)	Jerami padi dan lumpur tinja (sewage sludge); co-digestion mesofilik (35 ± 1,5 °C), 35 hari, TS optimum 40%	SS-AD (high-solid, TS optimum 40%)	Optimasi rasio co-digestion (70:30), pra-perlakuan biologis (bakteri selulolitik), variasi TS	Gompertz termodifikasi	Tidak dilakukan analisis dampak lingkungan	Pendapatan bersih pabrik 1 TPD \$66.010 dengan payback period 2 tahun

Studi Terdahulu	Bahan Baku; Pretreatment	Kondisi Sistem AD	Optimasi Sistem	Kinetika Produksi Biogas	Metode Analisis Dampak Lingkungan	Analisis Ekonomi
Sahil dkk. (2023)	Jerami padi; batch, suhu ambien (29–33 °C), pretreatment biologis konsorsium mikroba (5–10 hari)	L-AD (batch basah)	Pretreatment biologis konsorsium mikroba (durasi 5–10 hari)	Tidak disebutkan (fokus pada aktivitas enzim)	Tidak dilakukan analisis dampak lingkungan	Tidak dilakukan analisis ekonomi
Tamilselvan & Immanuel Selwynraj (2024b)	Sekam padi, kotoran sapi, dan limbah makanan; co-digestion, batch, mesofilik (30 ± 3 °C)	L-AD (co-digestion, batch basah)	Variasi rasio katalis (g- C_3N_4/SiO_2 /bentonite), durasi pretreatment fotokatalitik (1–9 jam), dan OLR	Laju hidrolisis diukur via pembentukan VFA dan pH	Tidak dilakukan analisis dampak lingkungan	Tidak dilakukan analisis ekonomi
Lantasi (2026)	Sekam Padi; Grinding dan pengayakan	L-AD (%TS 7-14)	Response Surface Methodology	Model Gompertz termodifikasi	Life Cycle Assessment	NPV, BCR, IRR

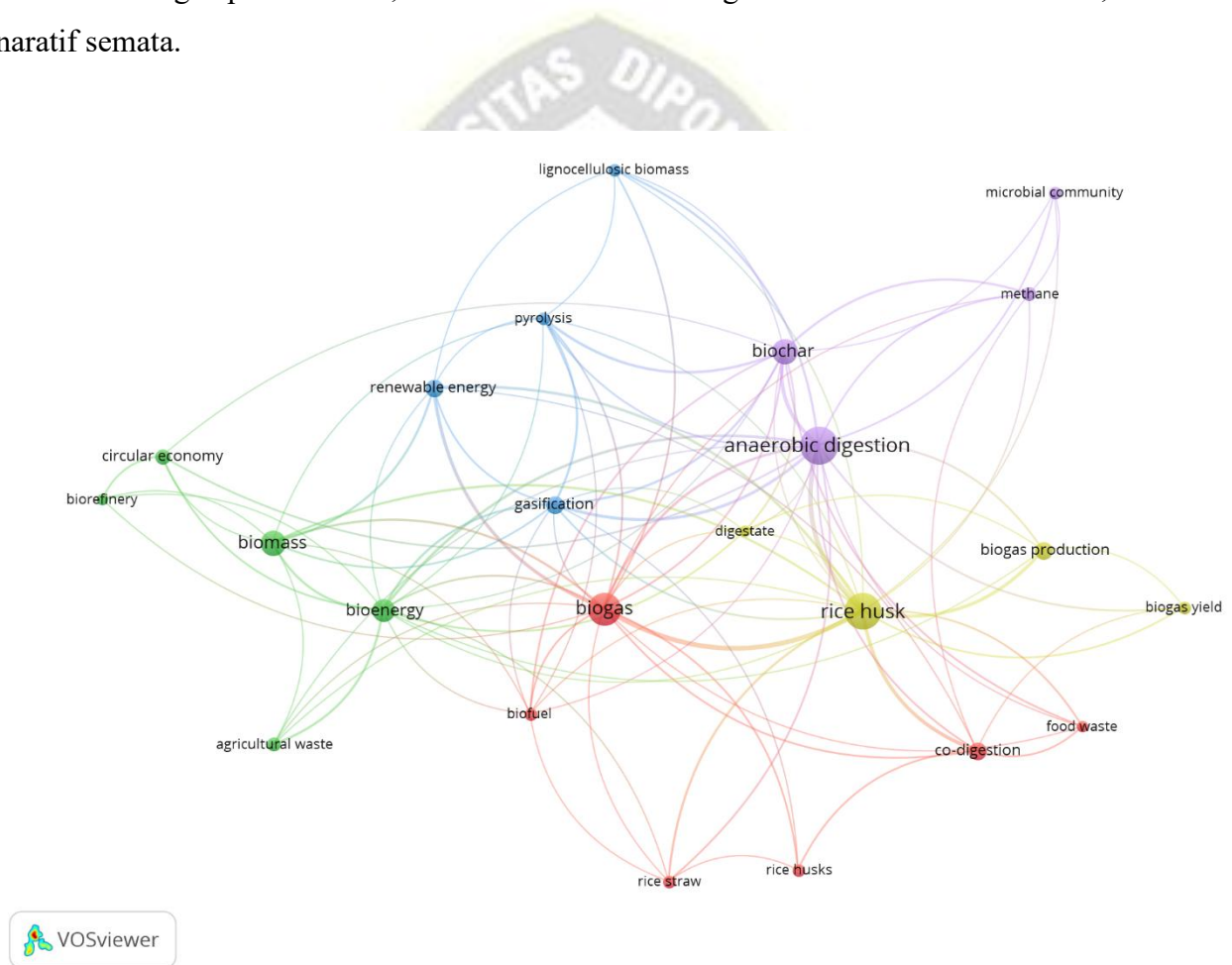
Data bibliometrik pada Gambar 4 dihimpun dari basis data Scopus melalui kueri penelusuran TITLE-ABS-KEY ("rice husk*" AND ("anaerobic digest*" OR biogas OR biomethane OR "bio-methane")), yang menjangkau seluruh publikasi yang memuat kombinasi kata kunci tersebut pada judul, abstrak, maupun kata kunci. Penanda "rice husk*" memfokuskan penelusuran pada sekam padi sebagai substrat, sementara klausa OR memperluas cakupan ke seluruh istilah jalur konversi biologis, yaitu anaerobic digestion, biogas, dan biomethane; tanda bintang (*) berperan sebagai operator pemenggalan kata sehingga varian bentukan seperti husks, digestion, dan digester turut terjaring. Penelusuran dibatasi pada rentang tahun publikasi 2010-2024 dengan tanggal akses 6 Januari 2025. Setelah seleksi sistematis mengikuti protokol PRISMA 2020 (Gambar 5), terjaring 54 dokumen (n = 54) yang menjadi korpus analisis. Metadata hasil penelusuran selanjutnya dianalisis menggunakan perangkat lunak VOSviewer versi 1.6.21 untuk membangun peta co-occurrence kata kunci sekaligus pembentukan kluster tematik, dengan ukuran simpul merepresentasikan frekuensi kemunculan istilah dan kedekatan antarsimpul menggambarkan kekuatan keterkaitan antartema.

Pemetaan bibliometrik terhadap basis data Scopus sebagaimana disajikan pada Gambar 4 memperlihatkan bahwa diskursus penelitian masih didominasi oleh tema proses dan substrat secara umum, seperti anaerobic digestion, biomass, dan circular economy. Sementara penanda spesifik berupa optimasi fisik pada sekam padi yang terintegrasi dengan penilaian keberlanjutan belum membentuk kluster tersendiri. Posisi penelitian ini berada tepat pada kekosongan tersebut.

Kekuatan utama peta terletak pada istilah-istilah yang tidak muncul. Istilah-istilah yang menjadi inti kebaruan disertasi ini sama sekali tidak tampak sebagai kluster yang mapan, yaitu total solids dan particle size sebagai dua faktor yang dioptimasi, response surface methodology dan central composite design, modified Gompertz atau kinetic modeling, liquid anaerobic digestion (L-AD), pretreatment atau grinding, serta techno-economic analysis atau economic feasibility. Ketiadaan penanda-penanda ini pada peta merupakan bukti empiris adanya celah penelitian, bukan kelemahan kajian.

Dengan demikian, literatur biogas sekam padi terkonsentrasi pada anaerobic digestion dan co-digestion dalam bingkai bioenergi dan ekonomi sirkular, sedangkan optimasi simultan dua faktor fisik yaitu Total Solid dan ukuran partikel untuk sekam padi bermatriks silika tinggi pada rezim L-AD, yang dirangkai dengan pemodelan kinetika, Life Cycle Assessment, dan analisis

ekonomi, belum terbentuk sebagai klaster penelitian tersendiri. Ruang kosong inilah yang diisi oleh disertasi ini. Secara spesifik, ketiadaan penanda-penanda tersebut pada peta ko-okurensi menautkan langsung hasil bibliometrik dengan keempat celah penelitian yang menjadi fokus disertasi ini, yaitu (1) belum adanya optimasi simultan kadar Total Solid dan ukuran partikel pada L-AD sekam padi melalui RSM-CCD; (2) belum adanya pemodelan kinetika produksi biogas yang terintegrasi dengan optimasi tersebut; (3) belum adanya penilaian dampak lingkungan berbasis Life Cycle Assessment; serta (4) belum adanya analisis kelayakan tekno-ekonomi. Dengan pemetaan ini, klaim kebaruan terdukung secara visual dan kuantitatif, bukan naratif semata.



Gambar 4. Visualisasi Keterhubungan Antar Kata Kunci

Satu catatan tambahan memperkuat pembingkaiannya tersebut: simpul *co-digestion* muncul cukup besar dan terletak berdekatan dengan *rice husk*, sehingga menegaskan bahwa arah dominan literatur adalah ko-digestion. Posisi penelitian ini yang menempatkan kotoran sapi sebagai

penyeimbang rasio C/N dan bukan sebagai ko-substrat justru membedakannya dari arus utama tersebut dan dapat dijadikan sebagai argumen pembeda.

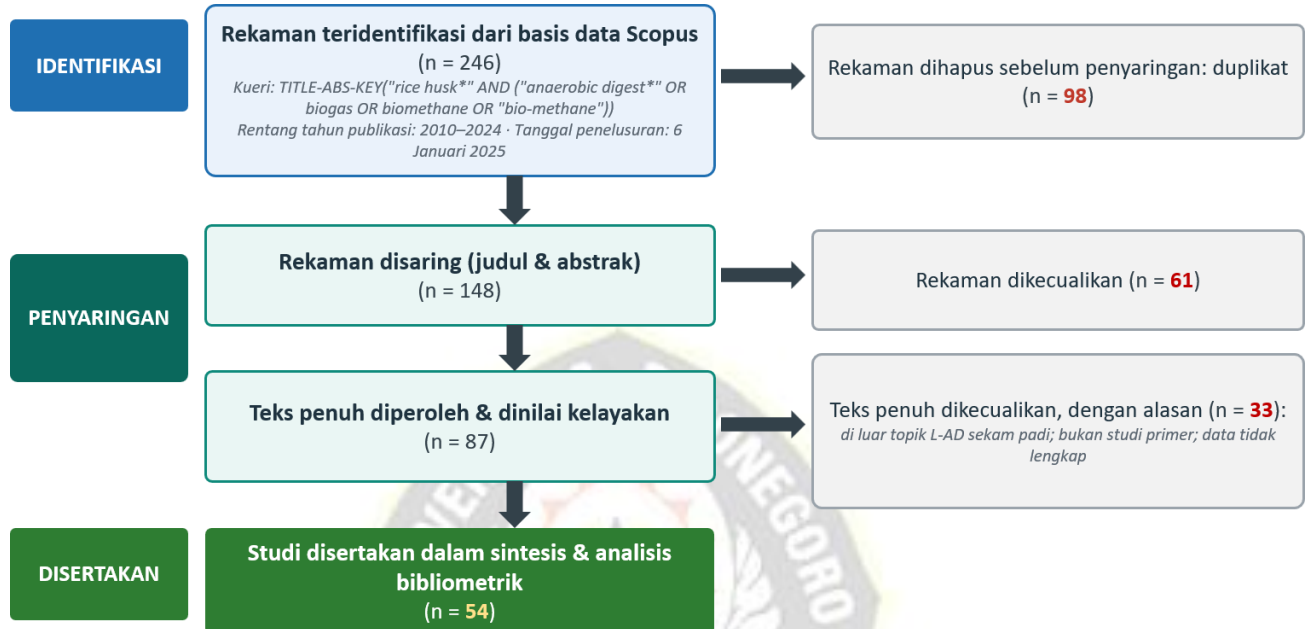
Gambar 5 dan Tabel 9 menyajikan diagram alir proses identifikasi, penyaringan, dan seleksi studi yang disusun mengikuti protokol Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) 2020 (Page et al., 2021). Proses diawali pada tahap identifikasi, yaitu penelusuran pada basis data Scopus menggunakan kueri TITLE-ABS-KEY("rice husk*" AND ("anaerobic digest*" OR biogas OR biomethane OR "bio-methane")) dengan rentang tahun publikasi 2010 sampai 2024 dan tanggal penelusuran 6 Januari 2025. Penelusuran tersebut menghasilkan 246 rekaman. Sebelum tahap penyaringan, sebanyak 98 rekaman duplikat dihapus sehingga tersisa 148 rekaman yang diteruskan ke tahap berikutnya.

Tabel 10. Protokol Penelusuran Sistematis Publikasi Anaerobic Digestion Sekam Padi pada Basis Data Scopus

Komponen Protokol	Keterangan
Basis data	Scopus
Kueri penelusuran	TITLE-ABS-KEY("rice husk*" AND ("anaerobic digest*" OR biogas OR biomethane OR "bio-methane"))
Rentang tahun publikasi	2010–2024
Tanggal penelusuran	6 Januari 2025
Perangkat analisis bibliometrik	VOSviewer versi 1.6.21 (peta ko-okurensi kata kunci)
Kriteria inklusi	Studi primer; relevan dengan liquid anaerobic digestion (L-AD) sekam padi; data lengkap
Kriteria eksklusi	Di luar topik L-AD sekam padi; bukan studi primer; data tidak lengkap
Tahap identifikasi	246 rekaman teridentifikasi dari Scopus
Penghapusan duplikat	98 rekaman dihapus; 148 rekaman diteruskan
Penyaringan (judul & abstrak)	61 rekaman dikecualikan; 87 rekaman lolos
Kelayakan (teks penuh)	33 rekaman dikecualikan; 54 rekaman lolos
Studi disertakan	54 studi (dasar sintesis dan analisis bibliometrik)

Pada tahap penyaringan, 148 rekaman ditelaah berdasarkan judul dan abstrak, dan sebanyak 61 rekaman dikecualikan karena tidak relevan dengan fokus penelitian, sehingga 87 rekaman dinyatakan layak untuk penilaian teks penuh. Penilaian kelayakan terhadap teks penuh selanjutnya mengeluarkan 33 rekaman dengan tiga alasan, yaitu berada di luar topik liquid anaerobic digestion sekam padi, bukan merupakan studi primer, atau memiliki data yang tidak lengkap. Dengan demikian, sebanyak 54 studi dinyatakan memenuhi kriteria dan disertakan

dalam sintesis serta analisis bibliometrik. Korpus 54 studi inilah yang menjadi dasar pemetaan ko-okurensi kata kunci dan identifikasi celah penelitian yang dibahas pada subbab berikutnya.



Gambar 5. Diagram alir PRISMA 2020 untuk seleksi rekaman publikasi anaerobic digestion sekam padi dari basis data Scopus (penelusuran 6 Januari 2025)

Keterangan: Kerangka PRISMA 2020 (Page et al., 2021). Basis data Scopus; rentang tahun publikasi 2010–2024; tanggal penelusuran 6 Januari 2025. Jumlah rekaman tiap tahap dilengkapi dari hasil penelusuran sistematis.

Sekolah Pascasarjana