

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Konsumsi energi adalah aspek mendasar dari peradaban manusia, yang menggerakkan setiap aspek kehidupan kita sehari-hari dan berkontribusi terhadap pertumbuhan ekonomi dan kemajuan teknologi. Energi fosil masih menjadi sumber energi yang paling banyak digunakan untuk mendukung kegiatan manusia sehari-hari. Secara historis, manusia sangat bergantung pada bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak, dan gas untuk memenuhi kebutuhan energinya (Perkins, 2018). Sejak revolusi industri pada tahun 1800-an sumber energi fosil mulai digunakan secara massif dan menjadi sumber energi utama secara global. Terjadi perubahan signifikan dalam masyarakat dari kegiatan pertanian ke industri yang menyebabkan lonjakan pembakaran bahan bakar fosil dan emisi gas rumah kaca. Transisi ini sangat mempercepat pelepasan karbon dioksida ke atmosfer, gas rumah kaca utama yang bertanggung jawab memerangkap panas dan berkontribusi terhadap pemanasan global. Ketergantungan pada bahan bakar fosil selama periode ini didorong oleh kebutuhan energi dalam proses industri yang secara signifikan juga meningkatkan emisi polutan khususnya karbon dioksida yang relatif stabil selama berabad-abad sebelum era industri. Pembakaran bahan bakar fosil selama revolusi industri telah menjadi kontributor utama perubahan iklim dan membentuk pemahaman baru terkait perubahan iklim yang disebabkan oleh aktivitas manusia. Pembakaran bahan bakar fosil selama revolusi industri memicu pemanasan global sejak tahun 1830-an sehingga mempercepat pemanasan global dan memicu peristiwa perubahan iklim. Produktifitas yang tinggi pada masa ini disertai dengan peningkatan tajam tingkat karbon dioksida di atmosfer melampaui 400 ppm pada abad ke-21 sehingga menimbulkan tantangan perubahan iklim yang signifikan.

Seiring dengan pertumbuhan populasi dunia dan kemajuan pembangunan ekonomi, terdapat peningkatan permintaan energi (Perkins, 2018). Namun ketergantungan pada bahan bakar fosil tidak akan berkelanjutan dalam jangka panjang. Ketersediaan sumber energi fosil yang terbatas diperkirakan akan habis dan mencapai kelangkaan. Bauran energi Indonesia sangat bergantung pada sumber daya tak terbarukan, sehingga memerlukan perubahan. menuju pemanfaatan energi terbarukan untuk menjamin keamanan energi dan kelestarian lingkungan. Ketika sumber

bahan bakar fosil semakin berkurang, penting bagi kita untuk menerapkan solusi energi terbarukan seperti biogas untuk memastikan masa depan yang berkelanjutan. Transisi ke sumber energi terbarukan sangat penting dalam mengatasi dampak negatif penggunaan bahan bakar fosil, seperti polusi udara, emisi gas rumah kaca, dan perubahan iklim. Konsep pemanenan dan pemanfaatan energi telah berubah drastis dalam satu dekade terakhir (Tobias et al., 2020). Memanen dan memanfaatkan energi dari sumber terbarukan, seperti biogas, telah banyak dikembangkan. Energi terbarukan memiliki keunggulan dapat diperbaharui dan lebih ramah lingkungan. Sumber energi terbarukan cukup melimpah dan mudah ditemukan disekeliling kita. Namun pemanfaatannya belum maksimal dan masih dapat terus ditingkatkan. Beberapa faktor yang mungkin menjadi hambatan untuk menerapkan teknologi pemanfaatan sumber energi terbarukan yaitu biaya investasi yang cukup tinggi. Salah satu sumber energi terbarukan tersebut adalah biogas, yang dihasilkan melalui pencernaan bahan organik secara anaerobik.

Biogas merupakan sumber energi terbarukan yang dihasilkan dari penguraian bahan organik seperti sisa makanan dan kotoran hewan melalui pencernaan anaerobik. Proses ini melibatkan mikroorganisme yang menguraikan bahan organik tanpa adanya oksigen, sehingga menghasilkan produksi biogas, yang terutama terdiri dari metana dan karbon dioksida. Biogas adalah bentuk energi terbarukan serbaguna yang dapat digunakan untuk pemanasan, pembangkit listrik, dan bahkan sebagai bahan bakar kendaraan. Biogas terdiri dari gas Metana dan Karbon dioksida serta gas lain seperti Hidrogen sulfida, Ammonia, dan Nitrogen dalam jumlah kecil. Produksi biogas telah banyak berkembang sejak empat abad yang lalu. Beberapa negara di Benua Eropa dan Amerika telah memanfaatkan teknologi biogas pada skala Industri sebanyak 2.200 lokasi di Amerika Serikat dan 109 lokasi di Inggris.

Biogas merupakan salah satu sumber EBT yang mengonversi limbah organik menjadi energi dengan dua metode umum yaitu secara thermokimia dan biokimia. Metode tersebut dapat mengakomodasi bahan baku basah atau kering secara ekonomis baik dalam skala kecil maupun besar. Salah satu teknologi konversi limbah organik menjadi energy yang terbukti efektif adalah melalui proses *anaerobic digestion* (AD) (Dahunsi et al., 2019a; Kainthola et al., 2019a). Proses *anaerobic digestion* (AD) dapat dilakukan dengan dua cara yaitu *solid state anaerobic digestion* (SS-AD) dan *liquid anaerobic digestion* (L-AD). Biogas dianggap sebagai energi terbarukan karena dihasilkan dari proses anaerobik bahan organik dan dianggap sebagai sumber energi

yang berkelanjutan dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Selain itu biogas yang dihasilkan dari limbah organik mampu mengatasi permasalahan pembuangan limbah dengan menjadikan limbah tersebut sebagai bahan baku. Biogas juga mampu mengurangi potensi pemanasan global dan jejak karbon dengan memanen atau memanfaatkan Gas Metana yang jika dilepas ke lingkungan dapat memperburuk dampak pemanasan global. Teknologi produksi biogas juga hanya membutuhkan satu kali nilai investasi dan tidak memerlukan biaya perawatan yang besar (Ahmadi Moghaddam et al., 2015; Bastola & Hiloidhari, 2024; Kasinath et al., 2021; Kurniawan et al., 2018; Sahota et al., 2018; Scarlet et al., 2018; Siddique & Wahid, 2018; Tjutju et al., 2024).

Indonesia bertujuan untuk mendiversifikasi bauran energi primernya dengan memasukkan sumber energi terbarukan untuk mengurangi ketergantungannya pada bahan bakar fosil. Melalui Kebijakan Energi Nasional (KEN) dan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), pemerintah menargetkan bauran energi baru terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025 serta menekankan pentingnya transisi menuju pilihan energi berkelanjutan. Namun, perlunya kebijakan yang mendorong diversifikasi energi dan memperhatikan sisi penawaran dan permintaan terutama di sektor batubara untuk mencapai bauran energi yang diinginkan. Bauran energi baru terbarukan pada konsumsi energi Indonesia ditargetkan sebesar 31% pada tahun 2050. Peluang nyata hadir dari sektor pertanian melalui komoditas padi. Badan Pusat Statistik melaporkan bahwa produksi padi Indonesia pada 2024 mencapai 53,14 juta ton gabah kering giling. Dalam proses penggilingan, sekam padi merupakan fraksi hasil samping yang jumlahnya besar. Sekam padi mewakili sekitar 20–30% bobot gabah dan tersusun oleh komponen lignoselulosa seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin (Ghatak & Mahanata, 2018; Kordi dkk., 2024). Dengan proporsi tersebut, dari produksi gabah nasional 2024 diperkirakan dihasilkan sekitar 10–16 juta ton sekam padi per tahun. Sehingga terdapat aliran biomassa sekam padi dalam jumlah besar setiap tahun dan sebagian masih belum dimanfaatkan secara optimal, sehingga layak dipertimbangkan sebagai substrat energi terbarukan berbasis biomassa.

Berbagai penelitian yang dilakukan sebelumnya telah menunjukkan potensi sekam padi untuk dijadikan sebagai substrat biogas. Sekam padi dihasilkan sebagai produk sampingan dari produksi padi. Sekam padi yang dihasilkan umumnya dibakar atau hanya ditumpuk tanpa ada pengolahan lebih lanjut. Sekam padi di Indonesia hingga saat ini banyak digunakan sebagai media tanam serta pupuk. Jika dilihat berdasarkan karakteristik kimianya sekam padi memiliki

potensi untuk dimanfaatkan sebagai salah satu sumber energi terbarukan. Limbah produksi padi terutama sekam padi merupakan bahan yang memiliki kandungan lignoselulosa tinggi. Sekam padi terdiri dari tiga jenis komponen utama yaitu selulosa, hemiselulosa dan lignin. Sebanyak 40% zat penyusun sekam padi adalah selulosa. Ketiga senyawa tersebut menyebabkan biomassa lignoselulosa memiliki tingkat biodegradasi yang rendah dikarenakan struktur kristalin lignin yang menyelimuti selulosa dan hemiselulosa. Struktur tersebut harus dipecah agar proses hidrolisis dapat berjalan lebih cepat. Oleh karena itu berbagai teknik dikembangkan untuk memudahkan proses anaerobik biomassa untuk menghasilkan biogas yaitu *pretreatment* (Kasinath et al., 2021; Sahil et al., 2023; Tamilselvan & Immanuel Selwynraj, 2024). Proses pretreatment terbukti mampu meningkatkan produksi biogas hingga $\geq 42\%$ dari kontrol serta merubah derajat polimerasi, meningkatkan luas permukaan, mengurangi kadar air bahan dan mengurangi kristalinitas bahan (Imtiaz Anando et al., 2023; Kasinath et al., 2021; Reddy et al., 2024)

Pemanfaatan limbah sekam padi menjadi sumber energi bukan hanya karena ketersediaannya yang melimpah, tetapi juga karena masalah lingkungan nyata. Limbah sekam padi yang ditumpuk, dibakar atau belum dimanfaatkan secara menyeluruh dapat menimbulkan permasalahan lingkungan. Praktik pembakaran terbuka residu pertanian diketahui meningkatkan emisi gas rumah kaca, partikulet tersuspensi, dan polutan udara lain yang menurunkan kualitas lingkungan dan kesehatan masyarakat. Berdasarkan penelitian gas rumah kaca yang dilepaskan ke lingkungan dari limbah pertanian adalah sebesar 53% dari rata-rata *Global Warming Potential* (Ahmadi Moghaddam et al., 2015). Pemanfaatan sekam padi dengan mengolahnya menjadi sumber energi tentunya akan lebih bermanfaat. Berdasarkan penelitian adopsi teknologi biogas berpengaruh terhadap penggunaan kayu bakar sebagai bahan bakar kompor yang digunakan di dapur sehingga lebih ramah lingkungan (Bastola & Hiloidhari, 2024; Rianawati et al., 2021). Kajian tentang limbah sekam padi juga menunjukkan bahwa pengelolaan yang tidak tepat dapat menimbulkan dampak kesehatan lingkungan, sedangkan pemanfaatannya sebagai biogas memberi alternatif yang lebih produktif. Karena itu, pemanfaatan sekam padi sebagai substrat biogas memiliki relevansi langsung terhadap SDGs 11, 12, 13, dan 15, terutama melalui pengurangan limbah, penurunan emisi, dan pemanfaatan sumber daya daratan secara lebih berkelanjutan (Matin dkk., 2023; Unsomsri dkk., 2025; United Nations, 2025).

Secara umum, konversi biomassa menjadi energi dapat dilakukan melalui jalur termokimia dan biokimia. Jalur termokimia mencakup pembakaran, pirolisis, dan gasifikasi, sedangkan jalur biokimia pada penelitian ini diwakili oleh anaerobic digestion untuk menghasilkan biogas. Untuk biomassa lignoselulosa, kedua jalur tersebut sama-sama berpotensi, tetapi anaerobic digestion lebih menarik ketika penelitian diarahkan pada produksi biogas, pemanfaatan digestate, dan integrasi dengan sistem pengelolaan limbah organik. Dalam klasifikasi anaerobic digestion, proses dibedakan menjadi *liquid anaerobic digestion* (L-AD) dan *solid-state anaerobic digestion* (SS-AD). L-AD bekerja pada kadar total padatan atau *total solid* (TS) yang lebih rendah, umumnya di bawah 15%, sehingga sistem lebih mudah diaduk, dipompa, dan dikontrol. Meskipun beberapa studi melaporkan SS-AD dapat memberikan produktivitas volumetrik yang lebih tinggi untuk sekam padi karena beban padatannya besar, penelitian ini memilih L-AD karena memungkinkan kadar TS dikendalikan sebagai variabel kontinu pada rentang di bawah 15% yaitu rentang yang menjadi variabel optimasi inti, sekaligus memberikan keunggulan pengendalian proses. Pemilihan ini merupakan bentuk kesesuaian dengan tujuan riset, bukan klaim keunggulan L-AD secara mutlak. Homogenitas pencampuran substrat-inokulum, serta risiko inhibisi lokal yang lebih rendah merupakan faktor penting untuk mengevaluasi pengaruh TS dan *pre-treatment* secara terkendali. Kondisi ini penting untuk penelitian yang ingin membandingkan pengaruh TS, mengevaluasi stabilitas proses, dan menyiapkan dasar penerapan pada skala lapangan (Brown dkk., 2012; Nugraha dkk., 2020; Schievano dkk., 2011).

Dalam penelitian ini TS dimaknai sebagai persentase total padatan dalam campuran substrat yang masuk ke reaktor. Variabel ini dipilih karena sangat menentukan karakter alir substrat, kebutuhan pengenceran, intensitas kontak antara mikroorganisme dan bahan organik, serta performa pembentukan biogas. Selain TS, sekam padi memiliki tantangan utama berupa struktur lignoselulosa yang relatif resisten terhadap degradasi anaerobik. Oleh sebab itu, diperlukan *pre-treatment* agar struktur biomassa lebih terbuka dan tahap hidrolisis berjalan lebih efektif. Berbagai telaah menunjukkan bahwa *pre-treatment* fisik, kimia, dan biologis dapat meningkatkan ketersediaan substrat untuk proses anaerobik. Namun, untuk konteks aplikasi yang ingin dijaga tetap sederhana dan realistis secara operasional, penelitian ini menggunakan *pre-treatment* fisik berupa grinding dan pengayakan 60 mesh. Pendekatan ini dipilih karena dapat memperbesar luas permukaan bahan, memperbaiki aksesibilitas fraksi organik, dan relatif

lebih mudah diterapkan dibanding pre-treatment kimia yang menambah kebutuhan bahan dan potensi beban lingkungan (Kainthola dkk., 2019; Kasinath dkk., 2021; Kaur, 2022).

Faktor lain yang memengaruhi produksi biogas juga perlu dijelaskan sejak awal agar posisi penelitian lebih tegas. Selain TS dan pre-treatment, produksi biogas dipengaruhi oleh pH, suhu, rasio C/N, kualitas inokulum, waktu retensi, serta kondisi pencampuran. Pada penelitian ini, faktor yang dioptimasi adalah TS dan pre-treatment, sedangkan faktor operasional lain dijaga pada kondisi yang dikendalikan agar pengaruh kedua variabel utama dapat diamati secara lebih jelas. Dengan demikian, rancangan penelitian tidak hanya menjawab apakah sekam padi dapat menghasilkan biogas, tetapi juga menjawab pada kondisi operasi seperti apa produksi tersebut menjadi paling efektif.

Penelitian terdahulu telah membuktikan bahwa sekam padi dapat digunakan sebagai bahan baku biogas, tetapi sebagian besar masih berfokus pada percobaan laboratorium, perbaikan yield, atau perbandingan perlakuan tertentu secara parsial. Kajian yang menghubungkan optimasi kondisi L-AD berbasis sekam padi, analisis laju produksi biogas, serta evaluasi lingkungan dan ekonomi dalam satu alur penelitian masih relatif terbatas. Kesenjangan inilah yang menjadi dasar perlunya penelitian tentang produksi biogas dari limbah sekam padi dengan metode L-AD, mulai dari pengujian pengaruh TS dan pre-treatment hingga penilaian dampak lingkungan dan kelayakan ekonominya.

1.2 Perumusan Masalah

Konsumsi energi yang masih didominasi oleh sumber energi fosil perlu bauran sumber energi baru terbarukan untuk mengurangi ketergantungan akan bahan bakar fosil. Salah satu sumber energi terbarukan yang dapat dikembangkan yaitu sumber energi yang berasal dari biomassa. Salah satu biomassa yang ketersediaannya melimpah adalah limbah dari kegiatan pertanian. Indonesia sebagai negara agraris dengan lahan pertanian terutama padi yang luas memiliki limbah dari kegiatan pertanian padi yang melimpah. Limbah dari kegiatan pertanian padi yaitu sekam padi belum dimanfaatkan dengan optimal dan sebagian besar ditumpuk atau dibakar di lahan terbuka pasca panen. Hal tersebut merupakan potensi yang dapat dimanfaatkan sebagai salah satu sumber energi terbarukan berupa biogas.

Tabel 1 Masalah dan Potensi Limbah Sekam Padi

Masalah	Potensi
Konsumsi energi Indonesia masih di dominasi oleh sumber energi fosil	Indonesia memiliki limbah sekam padi dari kegiatan pertanian yang cukup melimpah
Limbah sekam padi belum dimanfaatkan dengan optimal	Limbah sekam padi dapat dimanfaatkan sebagai substrat biogas
Masalah lingkungan akibat limbah sekam padi yang ditumpuk, dibakar, dan tidak dimanfaatkan	Mengatasi permasalahan lingkungan akibat limbah sekam padi

Permasalahan di atas dapat dibedakan menjadi dua poin utama. Pengelolaan sekam padi melalui penumpukan dan pembakaran terbuka terbukti merusak lingkungan dan menyia-nyiaakan sumber energi alternatif. Pemanfaatan sekam padi melalui teknologi L-ADD masih menghadapi kendala mendasar yaitu kondisi operasi optimal, khususnya interaksi TS dan *pretreatment* yang belum terpetakan. Selain itu data kinetika masih minim dan analisis antara biaya *pretreatment* dengan performa produksi serta dampak lingkungan belum dievaluasi. Kesenjangan tersebut menjadi fokus pada penelitian ini.

Penelitian ini akan berfokus pada produksi biogas dari sekam padi dengan metode L-AD. Berdasarkan rumusan masalah tersebut pertanyaan penelitian yang akan dikaji yaitu:

1. Bagaimanakah pengaruh TS dan *pretreatment* terhadap produksi biogas dari sekam padi dengan metode L-AD?
2. Bagaimanakah laju produksi biogas dari sekam padi dengan metode L-AD?
3. Bagaimanakah kondisi optimum biogas dari sekam padi dengan metode L-AD?
4. Bagaimanakah dampak lingkungan dan kelayakan ekonomi dari pemanfaatan sekam padi sebagai substrat biogas dengan metode L-AD?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh kadar TS dan ukuran partikel hasil *pretreatment* fisik terhadap produksi biogas kumulatif (volume total dan *yield* spesifik dalam mL/g TS) serta laju produksinya dari sekam padi dengan metode L-AD.

2. Menganalisis laju produksi biogas kumulatif dari sekam padi melalui pemodelan kinetika Gompertz termodifikasi, meliputi potensi produksi biogas (A), laju produksi maksimum (U_e), dan fase lag (λ).
3. Menganalisis kondisi optimum produksi biogas dari sekam padi menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) berbasis *Central Composite Design* (CCD).
4. Menganalisis dampak lingkungan melalui *Life Cycle Assessment* (LCA) dan kelayakan ekonomi dari pemanfaatan sekam padi sebagai substrat biogas dengan metode L-AD.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

Bagi pengembangan ilmu pengetahuan:

1. Menyediakan dasar ilmiah tentang pengaruh TS dan pre-treatment fisik terhadap produksi biogas dari sekam padi pada sistem L-AD.
2. Menambah bukti empiris mengenai laju produksi biogas dan kondisi operasi optimum untuk biomassa sekam padi yang bersifat lignoselulosa.

Bagi lingkungan dan kebijakan:

1. Memberikan alternatif pengelolaan sekam padi yang lebih ramah lingkungan dibanding penumpukan atau pembakaran terbuka
2. Mendukung pengembangan energi terbarukan, pengurangan emisi, dan pemanfaatan limbah pertanian yang sejalan dengan SDGs 7, 11, 12, 13, dan 15 serta arah transisi energi nasional
3. Menyediakan masukan bagi pengembangan sistem biogas berbasis residu pertanian yang mempertimbangkan aspek teknis, lingkungan, dan ekonomi secara terpadu

Bagi masyarakat dan pelaku usaha:

- Menawarkan opsi pemanfaatan sekam padi sebagai sumber energi terbarukan yang lebih bernilai tambah
- Menjadi dasar informasi bagi pengelola penggilingan padi, petani, dan pemerintah daerah dalam menilai kelayakan penerapan biogas berbasis sekam padi.

1.5 Kebaruan dan Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian mengenai produksi biogas dari biomassa lignoselulosa telah berkembang pesat dalam satu dekade terakhir. Literatur yang ada telah memetakan secara terpisah aspek pretreatment substrat, kinetika produksi, penilaian dampak lingkungan, serta kelayakan ekonomi.

Kebaruan penelitian ini tidak terletak semata pada penggabungan metode, melainkan pada pengetahuan baru yang dihasilkannya. Secara empiris, penelitian ini memetakan permukaan respons dua variabel fisik yaitu kadar *Total Solid* dan ukuran partikel hasil penggilingan, pada substrat tunggal sekam padi bermatriks silika tinggi melalui jalur *Liquid Anaerobic Digestion* dengan kotoran sapi sebagai penyeimbang rasio karbon terhadap nitrogen dan rumen sebagai inokulum sumber konsorsium mikroba. Kombinasi variabel dan substrat ini belum terdokumentasi pada literatur terdahulu yang umumnya memvariasikan satu faktor saja atau mengandalkan pretreatment kimia, sehingga melengkapi basis data kinetika substrat lignoselulosa berkadar silika tinggi.

Secara kontekstual, penelitian ini menyediakan dasar empiris bagi pemanfaatan sekam padi sebagai sumber bioenergi terdesentralisasi pada konteks Indonesia, lengkap dengan penilaian dampak lingkungan dan kelayakan ekonomi yang relevan dengan arah kebijakan energi terbarukan dan pengelolaan limbah pertanian nasional.

Pengintegrasian optimasi proses berbasis RSM dengan Central Composite Design, pemodelan kinetika Gompertz termodifikasi, penilaian dampak lingkungan berbasis Life Cycle Assessment, dan analisis kelayakan ekonomi dalam satu alur penelitian tertutup berfungsi sebagai instrumen metodologis yang memungkinkan ketiga kebaruan tersebut tercapai. Dengan demikian, integrasi metode diposisikan sebagai sarana untuk menghasilkan temuan, bukan sebagai kebaruan yang berdiri sendiri. Secara khusus terkait kebaruan akan dibahas lebih dalam pada subbab 2.11. Penegasan posisi kebaruan ini didukung secara sistematis melalui analisis bibliometrik (pemetaan ko-okurensi VOSviewer 1.6.21) dan seleksi literatur dengan protokol PRISMA 2020 yang menapis 54 studi relevan, yang secara empiris menunjukkan belum terbentuknya kluster optimasi simultan Total Solid dan ukuran partikel pada L-AD sekam padi. Secara ringkas, kebaruan penelitian ini dapat dinyatakan dalam tiga pilar. Pilar 1 (empiris): pemetaan permukaan respons dua faktor fisik, yaitu kadar Total Solid dan ukuran partikel, pada substrat tunggal sekam padi bermatriks silika tinggi melalui L-AD, dengan kotoran sapi sebagai

penyeimbang rasio C/N dan rumen sebagai inokulum, bukan sebagai ko-substrat. Pilar 2 (integratif): rangkaian tertutup optimasi RSM-CCD, kinetika Gompertz termodifikasi, Life Cycle Assessment, dan analisis tekno-ekonomi untuk satu objek penelitian yang sama. Pilar 3 (temuan): inversi nilai keberlanjutan, yaitu kelayakan sistem bertumpu pada digestate sebagai biopupuk (lebih dari 99% penerimaan), bukan pada energi biogas. Ketiga pilar ini didukung berturut-turut oleh data eksperimen (Pilar 1), alur metodologi terpadu (Pilar 2), dan hasil analisis ekonomi (Pilar 3). Adapun kesesuaian model Gompertz dan RSM pada sekam padi bersifat konfirmatif terhadap literatur dan tidak diklaim sebagai kebaruan, sehingga klaim kebaruan tetap terukur dan dapat dipertahankan.

Tabel 2. Matriks Posisi Kebaruan Penelitian terhadap Studi Terdahulu

Aspek	Studi terdahulu (umumnya)	Penelitian ini	Sifat
Substrat & komposisi	Sekam/jerami via ko-digesti atau pretreatment kimia	Sekam padi tunggal (mono-digesti); kotoran sapi penyeimbang C/N; rumen inokulum	Baru (empiris)
Faktor yang dioptimasi	Satu faktor terpisah (TS atau ukuran partikel)	Optimasi simultan TS × ukuran partikel via RSM-CCD	Baru (empiris)
Integrasi analisis	Parsial (umumnya teknis saja)	RSM–Gompertz–LCA–tekno-ekonomi pada satu objek	Baru (integratif)
Dasar kelayakan	Energi biogas	Digestate sebagai biopupuk (>99% penerimaan)	Baru (temuan)
Model kinetika & RSM	Gompertz/RSM pada sekam padi	Konsisten dengan literatur	Konfirmatif (bukan klaim baru)

Ruang lingkup penelitian dibatasi pada: (a) substrat berupa sekam padi dengan pre-treatment fisik (grinding dan pengayakan 60 mesh); (b) sistem L-AD batch pada kondisi mesofilik dengan kadar TS di bawah 15%, dipilih karena hanya rezim cair ini yang memungkinkan kadar TS divariasikan secara kontinu sesuai Central Composite Design sekaligus menjamin transfer massa dan distribusi inokulum yang lebih homogen, sebagaimana diuraikan pada Subbab 2.3.1; (c) variabel yang dioptimasi terbatas pada TS dan ukuran partikel, sedangkan pH, suhu, rasio C/N, dan kualitas inokulum dikendalikan; serta (d) penilaian lingkungan dan ekonomi yang mengacu pada batasan sistem dan asumsi yang ditetapkan pada Bab IV.