

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Tanaman Sagu

Tanaman sagu adalah salah satu tanaman sosioekonomi di Asia Tenggara dan persebarannya dimulai dari Papua Nugini kemudian tersebar di kepulauan Pasifik Selatan, membentang ke barat melalui Melanesia masuk ke Indonesia, Malaysia, dan Thailand (Karim et al., 2008). Tanaman sagu banyak dijumpai dan tersebar di beberapa wilayah Indonesia. Sekitar 60% persebaran tanaman sagu dunia berada di wilayah Indonesia. Indonesia memiliki luas wilayah tanaman sagu hingga 1,2 juta ha dengan jumlah produksi antara 8,4-13,6 juta ton per tahun dan Papua memiliki sekitar 90% dari areal sagu tersebut. Wilayah yang memiliki tanaman sagu antara lain Provinsi Papua, Papua Barat, Provinsi Maluku, Provinsi Sulawesi Utara, Provinsi Sulawesi Tengah, Provinsi Sulawesi Tenggara, Provinsi Sulawesi Selatan, Provinsi Kalimantan Selatan, Provinsi Kalimantan Barat, Provinsi Jambi, Provinsi Sumatera Barat, dan Provinsi Riau (Novariant, 2012).

Tanaman sagu merupakan tanaman yang ramah lingkungan, serbaguna, sangat bermanfaat secara ekonomi, kuat, dan menjadi contoh sistem *agroforestry* yang berkelanjutan secara sosial. Sagu merupakan tanaman keras, tumbuh subur di lahan gambut tetapi pertumbuhannya lebih lambat dibandingkan dengan kondisi tanah yang mengandung mineral tinggi, tanah yang asam, kondisi tanah yang bergaram dan terendam tempat beberapa tanaman dapat bertahan hidup dalam kondisi ekstrim tersebut (Flach & Schuiling, 1988). Tanaman sagu juga dapat mencegah terjadinya banjir, kekeringan, dan angin kencang. Akarnya yang

kuat, berserat dan sangat besar, dapat bertahan di dalam lumpur dan mengikat pencemar dan logam berat yang berada disekitarnya. Pertumbuhannya yang liar di alam membentuk hutan sagu yang dapat menyerap karbon dari karbon dioksida dengan sangat baik sehingga dapat menurunkan pemanasan global karena efek rumah kaca yang ditimbulkan oleh aktivitas industri dan polusi yang dikeluarkan oleh kendaraan bermotor (Singhal et al., 2008).

Sagu adalah kelompok tanaman monokotil dari famili Palmae, genus *Metroxylon* dan ordo *Spadiciflorae*. Di kawasan Indo Pasifik, masyarakat telah menggunakan tepung sagu dari kelompok palma *Metroxylon*, *Arenga*, *Corypha*, *Euqeiissona*, dan *Caryota* untuk kebutuhan sehari-hari. Sagu aren yang dikenal dengan *Arenga pinnata*, memiliki kandungan serat yang sangat besar dengan hampir seluruh batang adalah serat kasar. *Borassus caryota* atau dikenal dengan pohon lontar, memiliki cairan dengan kandungan alkohol yang cukup besar sehingga dapat diolah menjadi minuman beralkohol, buahnya disebut silawan dan batangnya dijadikan kayu untuk bahan bangunan. Kelompok sagu (*Metroxylon*) dalam ilmu botani dikelompokkan menjadi dua, yaitu palma sagu *pleoanthetic* yang berbunga dua kali atau lebih dan palma sagu *hapaxanthetic* yang berbunga hanya sekali. Pohon sagu yang berbunga hanya satu kali selama hidupnya mempunyai kandungan pati yang tinggi. Palma sagu yang termasuk dalam kelompok ini adalah *Metroxylon longispinum* Mart, *Metroxylon microcanthum* Mart, *Metroxylon rumphii* Mart, *Metroxylon sagu* Rott, dan *Metroxylon sylvester* Mart. Kandungan karbohidrat yang rendah dimiliki palma sagu golongan ini adalah *Metroxylon filare* dan *Metroxylon elantum*, berbunga lebih dari satu kali selama hidupnya sehingga kurang disukai. (Ebookpangan.com, 2006).

Jenis tanaman sagu yang berbunga hanya satu kali selama hidupnya dan banyak ditemui di beberapa wilayah di Indonesia, yaitu: 1) *Metroxylon longispinum* Mart atau sagu merah (*red sago*) dikenal dengan nama daerah sagu Makanaru, hidup di Kepulauan Maluku. Produksi tepung jenis tanaman sagu ini rendah sekitar 200 kg tiap pohon sehingga kurang disukai karena sagu jenis ini memiliki rasa pati yang kurang enak. 2) Sagu Rotan atau *Metroxylon microcanthum* Mart. Sagu ini banyak terdapat di daerah Kepulauan Maluku dan Pulau Seram tetapi tepungnya kurang disukai masyarakat. 3) *Metroxylon rumphii* Mart atau sagu Tuni dikenal dengan nama Lapia Tuni dan banyak terdapat di Ambon. Pohon sagu jenis ini dapat menghasilkan tepung sagu hingga 500 kg dan sangat disukai teksturnya. 4) Pohon sagu jenis *Metroxylon sagu* Rott mempunyai sebutan sagu Molat atau Lapia Mulat, banyak tumbuh dan dijumpai di Provinsi Riau. Setiap pohon mampu menghasilkan tepung sagu sampai 374,5 kg sehingga tepung sagu dari jenis ini paling disukai masyarakat. 5) Sagu Ihur atau *Metroxylon Sylvester* Mart, banyak terdapat di Kepulauan Halmahera akan tetapi tepung dari jenis ini kurang disukai karena rasanya kurang enak dan setiap pohon hanya menghasilkan 89,6 kg pati sagu (Ebookpangan.com, 2006).

Tiga jenis pohon sagu yang tumbuh di wilayah Sulawesi dan memiliki produksi pati tinggi, yaitu: 1) *Metroxylon sagu* Rott atau sagu Molat, merupakan kelompok sagu tidak berduri dengan sebutan lokal Tawaro roe, 2) *Metroxylon rumphii* Mart atau sagu Tuni, merupakan kelompok sagu berduri besar dengan bentuk batang tinggi besar, disebut juga Tawaro rungsa, 3) *Metroxylon Sylvester* Mart atau sagu Ihur, merupakan kelompok sagu yang memiliki duri pendek dan ukuran batang lebih kecil, disebut juga Tawaro rui (Tenda et al., 2003).

Sebagian besar tanaman sagu hidup berkelompok dengan membentuk rumpun di rawa-rawa. Ketinggian pohon sagu mencapai 15 m dengan ketebalan kulit sekitar 3 – 5 cm. Di alam ketinggian pohon sagu sekitar 10 m dengan lingkaran batang 35-50 cm atau bisa melebihi ukuran tersebut. Bagian yang terpenting dari pohon sagu adalah batangnya dimana batang bagian bawah lebih besar dibandingkan dengan bagian atas dimana dalam batang pohon sagu tersebut terdapat empulur yang mengandung karbohidrat. Kandungan pati terbanyak terdapat pada batang bagian bawah (Harsanto, 1986).



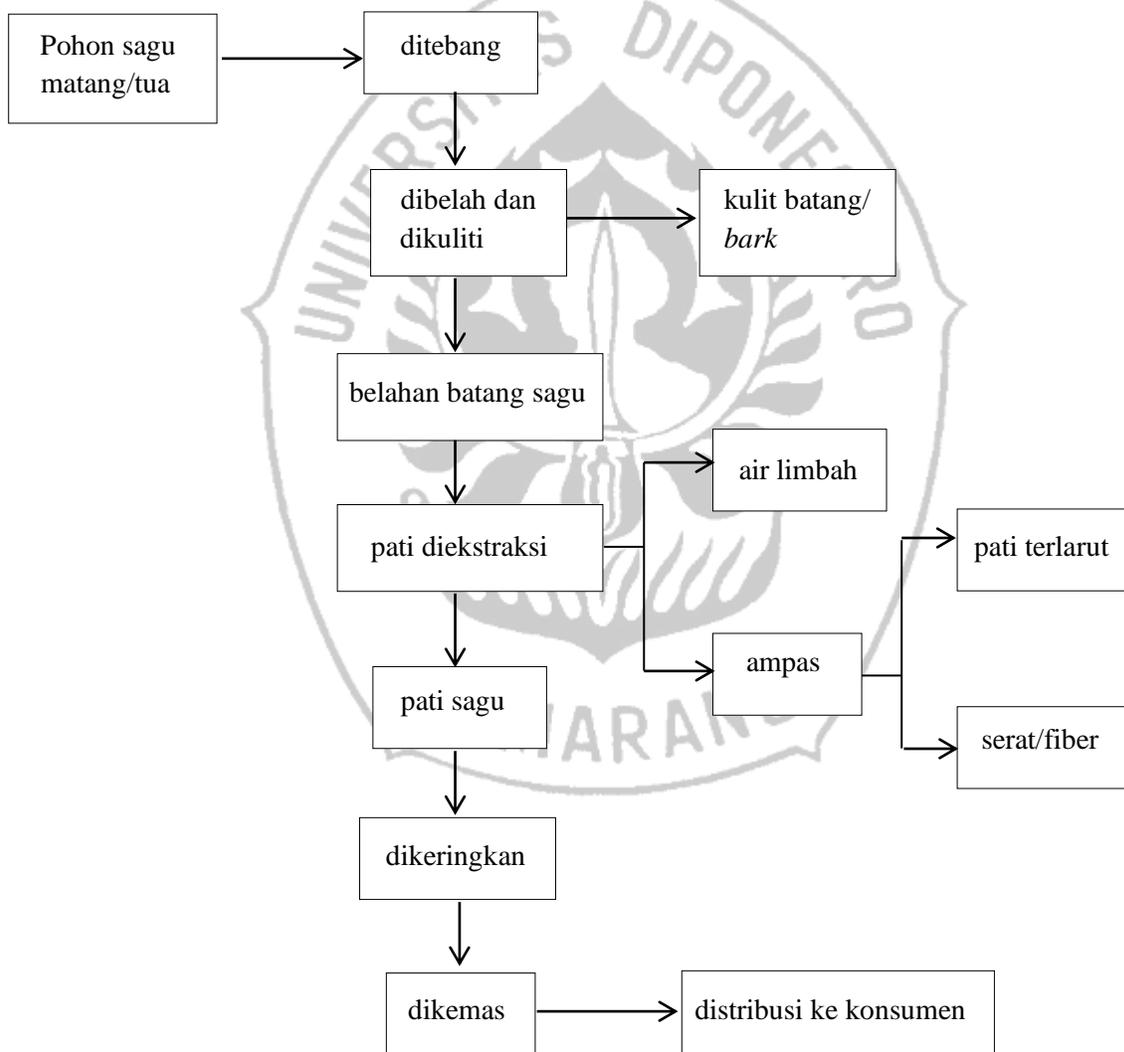
Gambar 1. Pohon sagu di dalam hutan sagu

Sagu adalah salah satu tanaman sumber karbohidrat terbaik dengan komposisi pati sagu dalam setiap 100 g sebesar 84,7 g. Perbandingan kandungan kalori dalam 100 g untuk beberapa sumber pati yang umum: jagung dengan 361 kalori, beras giling dengan 360 kalori, ubi kayu dengan 195 kalori, ubi jalar dengan 143 kalori, dan sagu mencapai 353 kalori. Akan

tetapi kandungan air yang dimiliki cukup tinggi yaitu 14,0 g sehingga membutuhkan penanganan khusus dalam pengolahannya (Ebookpangan.com, 2006).

1. Pengolahan Sagu

Pati sagu dapat diperoleh dengan melakukan pengolahan terhadap batang-batang pohon sagu. Proses pengolahan batang sagu dilakukan dengan cara ekstraksi untuk memisahkan ampas dan pati sagu yang terkandung didalamnya.



Gambar 2. Bagan proses ekstarksi pati sagu secara umum

Ekstraksi pati sagu melalui beberapa proses, yaitu pohon sagu yang telah matang atau tua dipotong menjadi beberapa potongan dengan panjang antara 40 – 70 cm, batang sagu atau gelondongan yang sudah ditebang kemudian dibersihkan dari kulit batang yang kasar kurang lebih 2 – 4 cm. Setelah itu diparut kemudian pati sagu dipisahkan dari serat, dikeringkan dan dikemas. Tepung sagu yang telah dikemas siap untuk didistribusi ke konsumen. Secara umum proses ekstraksi sagu dibedakan dalam dua metode, yaitu metode tradisional dan metode modern (pabrikasi). Metode modern banyak digunakan oleh masyarakat di Malaysia. Metode tradisional untuk ekstraksi pati sagu banyak dilakukan di Indonesia, seperti terlihat pada gambar 2.

Cara ekstraksi tradisional dilakukan oleh kelompok lokal dan dalam bentuk pabrik pengolahan skala kecil. Kelompok lokal dilakukan oleh petani secara perorangan dimana pohon sagu ditebang dan diproses sekaligus dalam satu tempat atau kebun sehingga memudahkan proses pengolahan karena tidak perlu mengangkat batang-batang sagu yang sangat berat (Karim et al., 2008) (gambar 3).



Gambar 3. Lokasi proses pengolahan sagu didalam hutan sagu

Sedangkan pabrik pengolahan sagu skala kecil biasanya dilakukan oleh sekelompok orang dengan cara mengumpulkan batang sagu yang sudah dipotong-potong pendek ukuran 1 sampai 1,2 m. Kelompok ini mengumpulkan dan membeli batang-batang sagu dari petani sagu yang tidak memiliki lahan untuk memproses secara langsung sagu miliknya (gambar 4).



Gambar 4. Proses pengolahan sagu yang dilakukan oleh pabrik skala kecil

Ekstraksi dengan cara modern merupakan modifikasi teknik pengolahan yang dilakukan oleh pabrik skala kecil (cara tradisional). Teknologi hasil modifikasi tersebut digunakan untuk mengekstraksi pati dalam pabrik skala besar. Dimana seluruh proses yang dilakukan sudah sepenuhnya menggunakan sistem mekanis. Mulai dari proses pemotongan pohon sagu menjadi beberapa bagian dengan panjang 1 sampai 1,2 m, mengupas kulit batang sagu (*debarking*) kemudian memasukkan ke dalam mesin *slicers* untuk mengiris empulur dari kulit sagu, memasukkan empulur sagu untuk diparut hingga menjadi bagian-bagian halus dengan menggunakan mesin *conveyor belt*. Proses ekstraksi pati sagu menghasilkan bubur pati, kemudian melewati mesin saringan sentrifugal untuk memisahkan serat kasar (ampas), pati

sagu, dan air limbah pencucian dan penyaringan. Untuk memperoleh pati yang sangat murni dilakukan pemisahan dan pemurnian menggunakan ayakan yang dilengkapi dengan pemisah *nozzle* dan pemisah *cyclone*. Pati yang diperoleh kemudian dikeringkan dengan menggunakan pengering *rotary vacuum* yang dilengkapi dengan mesin pengering udara panas. Semua proses tersebut dilakukan dengan menggunakan mesin (Karim et al., 2008).

2. Limbah Sagu

Proses pengolahan sagu untuk memperoleh pati sagu dihasilkan limbah dalam bentuk padat dan cair. Jenis limbah tersebut adalah kulit luar batang sagu (*bark*), sisa empulur sagu beserta ampas, dan air buangan. Jumlah kulit luar batang sagu yang terbuang sekitar 26%, dan ampas sagu 14% dari total keseluruhan berat balok sagu. Kandungan pati ampas sagu sekitar 65,7%, dan kandungan lainnya adalah serat kasar, protein, lemak dan abu. Proses ekstraksi sagu menggunakan air dalam jumlah banyak untuk memisahkan pati sagu dari seratnya sehingga proses ini menghasilkan ampas dan air buangan dalam jumlah banyak. Air hasil pencucian pati sagu masih mengandung pati dan selulosa yang berguna. Kandungan air limbah sagu yang masih mengandung pati dengan rasio perbandingan konsentrasi karbon dan nitrogen 105 : 0,12 menyebabkannya menjadi lebih sesuai digunakan untuk fermentasi secara anaerobik pada bak *upflow digester* (Phang et al., 2000).

Kandungan ampas sagu dan pati yang cukup besar didalam air sisa pencucian memberikan kontribusi terhadap peningkatan konsentrasi BOD dan COD perairan secara signifikan. Air limbah sagu bersifat asam (pH 4,2 – 4,6) dengan jumlah padatan terlarut yang melebihi ambang batas maksimum yang ditetapkan. Kandungan *Total Suspended Solid* (TSS) 2.240-8.240 mg/L dan *Total Dissolved Solid* (TDS) 8.060-14.260 mg/L. Padatan terlarut yang

terkandung dalam air limbah sagu adalah beberapa bahan organik seperti selulosa, lemak, protein dan mikroorganisme seperti bakteri dan alga yang terlarut didalam air limbah tersebut (Balasundaram et al., 2014). Air limbah sagu juga mengandung bahan anorganik dalam bentuk pasir halus dan lumpur alami yang sulit di degradasi oleh mikroorganisme, sehingga air limbah sagu dapat menyebabkan pencemaran perairan yang serius bila tidak diolah atau ditangani dengan cara yang benar, tanpa pengolahan dan pemanfaatan.



Gambar 5. Ampas sagu yang dihasilkan dari pencucian pati sagu

Ampas sagu adalah residu berserabut (lignoselulosa) yang dihasilkan setelah empulur sagu diparut dan dicuci dalam proses pengolahan pati sagu. Ampas sagu mengandung sekitar 60-70% pati dari berat kering. Jumlah ampas sagu yang dihasilkan dari proses ekstraksi pati sagu dipengaruhi oleh jenis tanaman, usia, tempat tumbuh, dan proses ekstraksi (Tabel 2). Pemanfaatan ampas sagu juga sebagai suplemen pada pakan ternak, kompos untuk media jamur, untuk hidrolisis dalam pembuatan sirup gula, dan untuk pembuatan papan partikel (Phang et al., 2000). Selain pemanfaatannya sebagai suplemen pada pakan ternak dan pupuk

organik, ampas sagu merupakan substrat yang sangat potensial untuk mengolah mikroba melalui proses fermentasi substrat padat menjadi produk lain yang bernilai tambah seperti enzim.

Tabel 2. Kandungan ampas sagu

Komponen	Persen (%)
Pati	65.7
Serat kasar	14.8
Protein	1
Lemak	0.20
Abu	4.1
Kadar air	59.1

Sumber: (Abd-Aziz, 2002)

Pemanfaatan ampas sagu lainnya adalah sebagai karbon tambahan yang digunakan dalam digester anaerobik untuk pembuatan biogas (Abd-Aziz, 2002). Hal ini sejalan dengan asas lingkungan ke-1 (pertama) yang mengatakan bahwa semua energi yang terikut dalam organisme hidup, populasi, atau ekosistem dapat dianggap sebagai energi yang tersimpan atau terlepas. Energi dapat berubah dari satu bentuk ke bentuk lain, tetapi tidak dapat hilang, dihancurkan, atau diciptakan (Setiadi, 2015). Biogas yang terbentuk dari hasil fermentasi anaerobik ampas sagu dapat dimanfaatkan oleh manusia sebagai sumber energi alternatif untuk kebutuhan sehari-hari, antara lain: untuk memasak, penerangan, atau bahan bakar dalam proses pengolahan (ekstraksi) sagu.

Proses pengolahan ampas sagu menjadi biogas menghasilkan produk samping atau sisa dalam bentuk lumpur (*sludge*) yang dapat dimanfaatkan sebagai pupuk karena kandungan unsur-unsur penting untuk pertumbuhan tanaman masih cukup tinggi. Pemanfaatan lumpur biogas sebagai pupuk organik mendukung asas lingkungan ke-2 (kedua), yang mengatakan

bahwa tidak ada sistem perubahan energi yang betul-betul efisien. Oleh karena itu, tanaman sagu menjadi salah satu sumber daya alam yang dapat digunakan oleh manusia untuk proses kelangsungan hidupnya sesuai dengan asas lingkungan ke-3 (ketiga) yang menyatakan bahwa materi, energi, ruang, waktu, dan keanekaragaman adalah sumber daya alam termanfaatkan (Setiadi, 2015)

B. Energi Baru Terbarukan

Kebutuhan energi nasional yang semakin meningkat ditunjang dengan jumlah cadangan energi fosil yang semakin berkurang. Indonesia termasuk negara yang sangat boros dalam menggunakan energi nasional. Elastisitas energi atau perbandingan nilai antara tingkat pertumbuhan konsumsi energi dan tingkat pertumbuhan ekonomi nasional menunjukkan angka yang cukup tinggi dibandingkan dengan negara lain, seperti Jepang dan Amerika Serikat yang memiliki elastisitas energi hanya 0,10 dan 0,26. Elastisitas energi nasional Indonesia cukup tinggi yaitu 1,84. Penggunaan energi nasional yang berasal dari minyak bumi masih sekitar 54,4%, gas bumi 26,5%, batubara 14,1%, tenaga air 3,4%, panas bumi 1,4%, sedangkan penggunaan bahan bakar nabati atau biofuel hanya sekitar 0,2% (Energi & Mineral, 2006).

Jumlah cadangan minyak bumi Indonesia hingga tahun 2025 sebanyak 8,4 miliar barel dengan produksi mencapai 348 juta barel. Jumlah cadangan gas bumi Indonesia sebanyak 165 TSCF dengan total produksi 2,79 TSCF, sedangkan cadangan batubara sebanyak 18,7 miliar ton dengan total produksi 201 juta ton. Jumlah ini sudah termasuk Blok Cepu dengan asumsi tidak ada penemuan cadangan baru. Elastisitas energi Indonesia terus diupayakan sehingga pada tahun 2025 mendatang mencapai angka kurang dari satu untuk mencapai energi mix

primer yang optimal. Angka penggunaan bahan bakar minyak juga akan ditekankan hingga mencapai kurang dari 20%, digantikan dengan penggunaan bahan bakar nabati yang mencapai sekitar 5% (Kusdiana, 2008).

Peningkatan kebutuhan energi nasional mendorong pemerintah mencari sumber energi alternatif. Indonesia sebagai negara pertanian dan perkebunan terbesar memiliki potensi besar sebagai sumber energi baru terbarukan dalam bentuk bioenergi. Menurut Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional, energi terbarukan adalah sumber energi yang dihasilkan dari sumberdaya energi yang secara alamiah tidak akan habis dan dapat berkelanjutan jika di kelola dengan baik, antara lain: panas bumi, biofuel, aliran air sungai, panas surya, angin, biomassa, biogas, ombak laut, dan suhu kedalaman laut (Indonesia, 2006).

Ilmu pengetahuan dan teknologi yang terus berkembang menyebabkan bioenergi juga mengalami transformasi menjadi bentuk yang lebih modern. Bioenergi tradisional yang sering ditemui adalah kayu bakar, sedangkan bioenergi yang lebih modern antara lain: bioetanol, biodiesel, PPO atau SVO, minyak bakar, dan biogas. Bioenergi memiliki beberapa kelebihan, yaitu bisa diperbaharui, ramah lingkungan, dapat terurai, mampu mengurangi efek rumah kaca, dan kontinuitas bahan bakunya terjamin. Bioenergi dihasilkan dengan cara yang cukup sederhana, yaitu dengan melakukan budidaya terhadap tanaman penghasil biofuel dan memelihara hewan ternak.

Indonesia memiliki potensi untuk mengembangkan sektor pertanian dan perkebunan terhadap tanaman penghasil bioenergi, yaitu: tanaman jarak, kapas, tebu, kelapa sawit, singkong, dan sagu. Bahan baku utama bioenergi yang telah dikembangkan adalah tanaman

jarak pagar dan kelapa sawit untuk bahan utama bio-oil/biodiesel, sedangkan tanaman singkong dan tebu digunakan untuk bahan baku bioetanol. Tanaman perkebunan yang mendapat perhatian dan masuk dalam tahap pengembangan antara lain: tanaman kelapa, karet, kemiri, micro algae, dan limbah minyak untuk bahan baku pembuatan bio-oil/biodiesel. Sedangkan tanaman sorgum manis, aren, sagu, jagung, dan limbah-limbah organik menjadi bahan baku bioetanol. Hal ini sejalan dengan kebijakan energi nasional dalam penyediaan dan pemanfaatan energi terbarukan yang terdapat dalam Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2007 tentang Energi (Kusdiana, 2008). Beberapa bentuk energi diantaranya dapat digunakan di tanah air, seperti: bioetanol untuk menggantikan bensin, biodiesel untuk menggantikan solar, tenaga panas bumi, mikrohidro, tenaga surya, tenaga angin, bahkan limbah organik juga dapat dimanfaatkan untuk membangkitkan listrik. Penerapan sumber energi tersebut telah dilakukan dalam skala kecil di tanah air.

Salah satu komoditi perkebunan yang tersebar di beberapa kepulauan Indonesia adalah tanaman sagu. Setiap batang pohon sagu dapat menghasilkan ± 200 kg tepung sagu dan bioetanol sekitar 30 liter. Pohon sagu yang bisa dipanen setiap satu kali panen berkisar 35 pohon/ha/tahun. Namun kendala yang ada adalah populasi pertanaman yang tersebar, baik dalam satu daerah maupun antara pulau dan sebagian besar berada di daerah yang sulit dijangkau, tetapi pemerintah daerah setempat dapat memanfaatkan potensi sagu tersebut untuk keperluan daerah setempat (Prastowo, 2015). Umur panen pohon sagu di masing-masing wilayah di Indonesia juga bervariasi, sekitar 7-12 tahun dimana produksi tepung basah per batang berkisar antara 90-700 kg (Syakir & Karmawati, 2013).

C. Biogas

Biogas adalah teknologi energi baru terbarukan yang memberikan banyak manfaat, antara lain residu yang dihasilkan dari proses produksi biogas dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik yang berkualitas tinggi. Selain itu, biogas adalah energi alternatif yang murah, efisien, dan lebih ramah lingkungan. Gas yang dihasilkan ramah lingkungan karena merupakan proses fermentasi bahan organik dengan bantuan mikroorganisme melalui proses anaerob. Beberapa pemanfaatan biogas untuk kehidupan adalah digunakan untuk pembangkitan panas dan listrik, bahan bakar kendaraan bermotor menggantikan bensin, injeksi ke dalam sistem perpipaan gas, dan di konversi menjadi bahan kimia yang lain (Kangmin & Ho, 2006).

Biogas adalah hasil akhir dari proses fermentasi atau degradasi bakteri anaerobik terhadap bahan-bahan organik dalam kondisi tanpa oksigen atau udara. Semua jenis bahan dapat diolah menjadi biogas, tetapi kebanyakan bahan organik padat, limbah pertanian, atau limbah cair seperti limbah peternakan maupun limbah organik yang dimanfaatkan untuk produksi biogas secara sederhana. Produksi biogas dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

- a. Jenis bahan baku yang diproses. Bahan baku yang mengandung selulosa akan lebih mudah didegradasi oleh bakteri anaerobik jika dibandingkan dengan bahan baku yang lebih banyak mengandung lignoselulosa atau zat kayu (Paimin, 2001).
- b. Rasio karbon dan nitrogen. Produksi biogas ditentukan oleh mutu bahan organik sampel dengan melihat rasio/perbandingan antara kandungan Karbon (C) dan Nitrogen (N). Jika rasio karbon dan nitrogen dalam bahan organik sampel tinggi, akan memudahkan

mikroorganisme menghasilkan senyawa metana. Akan tetapi jika rasio C/N rendah, dapat meningkatkan nilai pH bahan sehingga dapat meracuni bakteri anaerobik. Rasio C/N yang digunakan dalam proses produksi berkisar antara 20:1 sampai 30:1 dengan rasio optimal untuk proses pertumbuhan bakteri anaerobik dalam digester adalah 25:1 (Pang et al., 2008; Parkin & Owen, 1986). Untuk menghasilkan rasio C/N yang optimal, bahan organik yang dengan perbandingan C/N tinggi dapat ditambahkan dengan bahan organik yang mempunyai perbandingan C/N rendah.

Bahan organik yang dapat digunakan adalah salah satunya adalah kotoran sapi karena memiliki perbandingan nilai C/N yang tinggi dan banyak mengandung konsorsium bakteri yang cukup kompleks yang dapat membantu mencerna lignoselulosa dengan baik serta ikut bekerja dalam proses fermentasi anaerob (Koike et al., 2003; Krause et al., 2013). Kelompok mikroorganisme yang terdapat dalam kotoran sapi, antara lain: kelompok bakteri (*Bacillus spp.*, *Corynebacterium spp.*, dan *Lactobacillus sp*), protozoa, dan jamur (*Saccharomyces* dan *Candida*) (Randhawa & Kullar, 2011). Berdasarkan hasil ekstraksi dari kotoran sapi segar ditemukan kelompok bakteri dari filum Bacteroidetes (*Bacterioides*, *Alistipes*, dan *Paludibacter*); filum Firmicutes (*Clostridium*, *Ruminococcus*, *Anaerovorax*, dan *Bacillus*); filum Proteobacteria (*Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Rheinheimera*, *Stenotrophomonas*, dan *Rhodobacter*); serta filum Verrucomicrobia (*Akkermansia*). Kelompok bakteri tersebut ditemukan bekerja sangat efisien dalam mendegradasi lignoselulosa dan senyawa organik kompleks lainnya (Giriya et al., 2013).

Salah satu hasil penelitian menunjukkan bahwa bakteri metanogenik dari komunitas Archaea bekerja dalam proses fermentasi anaerob dalam reaktor menghasilkan metana.

Kelompok mikroba Archaea yang bekerja dalam reaktor adalah *Methanosarcina barkeri* dan *Methanobacterium* (Li et al., 2017). Akan tetapi, jika kotoran sapi digunakan sebagai substrat tunggal, maka kualitas biogas yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan dengan kotoran ternak lainnya karena kotoran sapi banyak mengandung lignoselulosa yang diperoleh dari pakan yang dikonsumsi dan sulit dicerna (Monteiro et al., 2011)

- c. Komposisi bahan kering. Bahan baku yang dibutuhkan untuk produksi biogas sebaiknya dalam bentuk bubuk. Mikroba penghasil gas metana membutuhkan sekitar 80% air dan 20% kandungan kering dari bahan baku. Jika bahan baku yang digunakan memiliki kadar air yang rendah, dapat dijadikan berkadar air tinggi dengan menambahkan air perbandingan tertentu sesuai kadar bahan kering dalam bahan baku tersebut. Untuk memperoleh komposisi yang tepat, bahan baku harus diencerkan terlebih dahulu dengan menambahkan air dengan perbandingan 1:2. Hal ini bertujuan untuk memudahkan slurry masuk kedalam digester dan menghindari terbentuknya sedimen yang dapat mempengaruhi kerja mikroba anaerobik (Paimin, 2001).
- d. Suhu. Proses produksi biogas adalah hasil dari fermentasi sejumlah mikroorganisme dalam kondisi anaerobik. Suhu yang baik untuk proses fermentasi antara 30 – 55 °C (Kamaruddin et al., 1999). Mikroorganisme penghasil gas metana membutuhkan suhu tertentu untuk bekerja dengan baik. Suhu yang tinggi dapat menghasilkan biogas yang baik, tetapi suhu yang digunakan tidak boleh melebihi suhu kamar karena mikroorganisme tidak dapat bekerja maksimal. Selain itu, digester dengan menggunakan suhu yang tinggi proses operasionalnya rumit. Suhu yang baik untuk proses produksi biogas antara 20-40 °C dengan suhu optimum antara 28-30 °C (Paimin, 2001). Suhu yang stabil mempengaruhi

proses fermentasi yang terjadi dalam digester. Selain itu suhu juga dapat mempengaruhi secara langsung waktu retensi dalam digester dapat dilihat pada tabel 3 (Al Seadi et al., 2008).

Tabel 3. Tahapan termal dan lama waktu retensi

Tahapan Termal	Kisaran Suhu	Waktu Retensi Minimum
Psychrofilik	< 20 °C	70 – 80 hari
Mesofilik	30 – 42 °C	30 – 40 hari
Thermofilik	43 – 55 °C	15 – 20 hari

Sumber: (Al Seadi et al., 2008)

- e. Derajat keasaman (pH). Produksi biogas sangat dipengaruhi oleh derajat keasaman. Derajat keasaman optimum untuk aktivitas mikroba adalah 6,8-7,8. Tahap awal degradasi bahan organik akan menghasilkan senyawa organik yang dapat menurunkan nilai pH yang dapat mengganggu fermentasi, namun dapat dicegah dengan memasukkan larutan kapur ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) atau kapur CaCO_3 kedalam campuran substrat (Simamora & Salundik, 2006).
- f. Lama waktu fermentasi. Waktu yang dibutuhkan untuk proses fermentasi adalah berapa lama hari yang diperlukan untuk proses pencernaan pada bioreaktor sejak pemasukan bahan organik sampai biogas terbentuk. Produksi biogas dipengaruhi oleh jenis substrat dan perlakuan yang digunakan terhadap bahan organik sebelum proses pencernaan dilakukan, serta lama bahan organik difermentasi dengan mikroorganisme. Semakin Panjang waktu pencernaan anaerobik maka hasil yang diperoleh semakin maksimal.

Proses produksi biogas membutuhkan pembangkit yang disebut digester. Proses penguraian material organik akan berlangsung dalam digester dan terjadi secara anaerob (tanpa oksigen).

Biogas dapat terbentuk pada hari ke 4–5 setelah pengisian digester dan mencapai titik optimal pada hari ke 20– 25.

Ampas sagu adalah salah satu limbah padat yang masih banyak mengandung lignoselulosa sehingga dapat dimanfaatkan sebagai sumber karbon. Kandungan pati ampas sagu sekitar 65,7% (residu lignin 21% dan selulosa sekitar 20%), sedangkan sisanya dalam bentuk serat kasar, protein, lemak, zat ekstraktif, dan abu (Lim, 2006). Kandungan lignoselulosa yang tinggi menyebabkan mikroorganisme sulit untuk mendegradasi sendiri pati dalam proses fermentasi. Oleh karena itu dibutuhkan perlakuan awal atau pretreatment sebelum bahan dimasukkan dalam digester.

Metode pretreatment untuk biomassa yang mengandung lignoselulosa dapat dilakukan secara fisika, kimia, biologi, atau menggunakan dua metode sekaligus. Bahan kimia yang digunakan untuk pretreatment secara kimia, antara lain: asam (Antonopoulou et al., 2010; Monlau et al., 2013), basa (Chandra et al., 2012; Liew et al., 2011; Mirahmadi et al., 2010), cairan ionik yang dapat mempengaruhi karakteristik fisikokimia lignoselulosa dari biomassa (Zheng et al., 2014). Pretreatment secara biologi dilakukan dengan menggunakan mikroorganisme secara hidrolisis enzimatik (Romano et al., 2009; Zieminski et al., 2012). Mikroorganisme berfungsi untuk mengurai lignoselulosa walaupun hanya sedikit dari selulosa yang dapat didegradasi karena selulosa lebih tahan daripada bagian lain lignoselulosa. Mikroorganisme yang digunakan dapat dari kelompok jamur (Fatriasari et al., 2014; Ishola et al., 2012; Risanto et al., 2012), mikroba konsorsium (Zhang et al., 2011), atau menggunakan enzim-enzim seperti Laccase, Pectinase, campuran enzim cellulase dan hemiselulase,

campuran enzim cellulase, hemiselulase, dan β -glukosidase, serta konsorsium enzim *Tricoderma* (Matin, 2018).

Proses ekstraksi pati sagu menghasilkan ampas sagu yang memiliki kandungan lignoselulosa yang besar dan struktur kompleks. Struktur lignoselulosa yang kompleks dapat menyebabkan proses hidrolisis dalam degradasi anaerobik terganggu sehingga produksi metana menjadi berkurang. Penggunaan isolat tunggal pada proses pretreatment dapat menyebabkan kerja umpan balik terganggu dan represi metabolit (Soundar & Chandra, 1987). Sedangkan mikroba konsorsium mengandung berbagai bakteri anaerob fakultatif non-selulolitik dan bakteri selulolitik yang bekerja secara simbiosis (Tuesorn et al., 2013). Bakteri tersebut memiliki sistem enzim lignoselulolitik yang terdiri dari komponen selulosomonal dan selulase ekstra seluler sehingga penggunaan mikroba konsorsium lebih disarankan karena sangat efektif dan efisien dalam mendegradasi substrat yang banyak mengandung lignoselulosa (Kato et al., 2005).

Pretreatment secara fisik dapat dilakukan untuk meningkatkan luas permukaan, mengurangi kristalinitas dan derajat polimerisasi selulosa (Keshwani & Cheng, 2010; Mood et al., 2013; Taherzadeh & Karimi, 2008). Pretreatment secara fisik dapat digunakan untuk mempercepat hidrolisis enzimatik atau degradasi lignoselulosa, antara lain dengan penggilingan (penggilingan bola, penggilingan hammer, penggilingan koloid) dan iradiasi (sinar gamma, berkas elektron atau gelombang mikro) (Matin, 2018).

Tahap yang berlangsung selama proses produksi biogas adalah fermentasi secara anaerobik yang terbagi atas (Nadliriyah & Triwikantoro, 2014):

- a. Tahap hidrolisis, yaitu tahap dimana biomassa yang mengandung selulosa, hemiselulosa dan bahan ekstraktif seperti protein, karbohidrat dan lipida akan terurai menjadi senyawa dengan rantai yang lebih pendek. Proses ini dilakukan oleh kelompok bakteri hidrolitik yang sebagian besar bekerja secara anaerob, antara lain: Bacterioides, Clostridia, dan Bifidobacteria, serta beberapa bakteri anaerob fakultatif, antara lain: Streptococci dan Enterobacteriaceae (Weiland, 2010). Proses pemutusan rantai kompleks menjadi lebih sederhana dibantu dipercepat dengan memberikan perlakuan awal pada bahan.
- b. Tahap asidogenesis, yaitu tahap dimana bakteri akan memproduksi asam organik yang digunakan untuk mengubah senyawa organik sederhana hasil hidrolisis menjadi asam asetat, hidrogen dan karbon dioksida. Bakteri ini merupakan bakteri anaerob yang dapat tumbuh pada keadaan asam. Untuk menghasilkan asam asetat, bakteri memerlukan oksigen dan karbon yang diperoleh dari oksigen yang terlarut dalam larutan. Selain itu, bakteri tersebut juga mengubah senyawa yang bermolekul rendah menjadi alkohol, asam organik, asam amino, CO₂, H₂S dan sedikit gas CH₄.
- c. Tahap metanogenesis, yaitu tahap proses anaerobik dimana gas metana dibentuk dengan bantuan bakteri metanogen pembentuk metana seperti Methanococcus, Methanosarcina, dan Methanobacterium. Pada tahap ini, enzim spesifik dari bakteri metanogen menghasilkan metana dan CO₂ dari perubahan bentuk produk antara. Enzim yang bekerja adalah asetil-CoA dekarboksilase dan metil-koenzim M reductase (Mcr) yang bertugas untuk mengkatalisis dan mengubah metil koenzim M menjadi metana. Kedua enzim tersebut terdapat pada seluruh kelompok bakteri metanogenik yang bekerja pada tahap metanogenesis (Lin et al., 2016). Proses ini berlangsung paling cepat 14 hari dengan suhu

35 °C di dalam digester pada pH optimum berada pada kisaran 6,8 – 7,2 dalam kondisi sangat anaerobik.

Konsentrasi biogas yang diperoleh bergantung pada kandungan gas metan yang dihasilkan. Kandungan energi (nilai kalor) pada biogas besar dengan semakin banyak gas metan yang dihasilkan, demikian pula sebaliknya nilai kalor akan semakin kecil jika kandungan gas metana yang dihasilkan sedikit. Kualitas biogas ditunjukkan oleh kondisi tersebut yang belum optimal dan hasilnya dapat ditingkatkan dengan menghilangkan gas-gas pengotor yang ikut terbentuk saat gas metana terbentuk. Gas pengotor tersebut dapat mengganggu proses pembakaran, menurunkan nilai kalori, mengeluarkan gas beracun, menyebabkan korosi pada peralatan yang digunakan, dan menghasilkan bau yang berbahaya bagi kesehatan dan lingkungan (Harihastuti, 2015).

Produksi biogas menghasilkan beberapa senyawa yang dapat menyebabkan emisi di udara, yaitu gas metan itu sendiri, karbon dioksida, ammonia (NH_3), hidrogen sulfida, dan gas-gas pengotor lainnya. Selain itu, proses pembuatan bubur (*slurry*) biogas menimbulkan bau yang kurang sedap di sekitar reaktor biogas. Bau tersebut dapat mengganggu kesehatan masyarakat di sekitar lokasi reaktor dengan tingkat paparan yang berbeda (Khoiyangbam, 2011). Masalah lingkungan tersebut dapat muncul karena reaktor biogas seringkali tidak dikelola dengan baik dan distribusi gas yang dihasilkan juga tidak diperhatikan sehingga menjadi tidak aman sampai pada masyarakat terutama untuk reaktor biogas skala rumah tangga. Hal ini dapat menyebabkan kebocoran pada reaktor dan instalasi terlebih jika permintaan biogas melebihi dari kemampuan produksi reaktor sehingga gas-gas tersebut dapat terlepas ke udara tanpa disadari (Bruun et al., 2014).

Beberapa hasil penelitian menunjukkan efisiensi reaktor dalam memproduksi biogas. Penelitian di China menemukan bahwa hanya 60% digester dapat beroperasi secara efisien (Chen et al., 2010). Studi di Vietnam ditemukan bahwa tutup kubah reaktor biogas untuk skala rumah tangga mudah rusak dan katup gas menjadi tidak kedap udara sehingga menyebabkan kebocoran gas dan terbebas ke atmosfer (Thu et al., 2012). Demikian pula dengan studi yang dilakukan di Pakistan, dimana ditemukan reaktor biogas yang mengalami kebocoran gas karena dinding reaktor retak akibat perubahan suhu dalam reaktor yang berubah-ubah (Nazir, 1991).

Gas metana yang dihasilkan dan terkumpul dalam ruang digester yang dikosongkan dapat mencapai tingkat konsentrasi yang berbahaya sehingga dapat membahayakan kesehatan pekerja yang membersihkan ruang tersebut. Sedangkan hidrogen sulfida yang merupakan salah satu gas berbahaya yang ikut terbentuk saat biogas diproduksi. Gas ini tidak berwarna dan sering terbentuk di atas permukaan bubur biogas serta menjadi lebih cepat terbentuk dengan tingkat konsentrasi yang semakin bertambah jika bubur biogas dalam digester diaduk. Selain itu, hidrogen sulfida yang tidak dihilangkan dari biogas kemudian digunakan sebagai bahan bakar dapat terlepas ke udara serta menyebabkan korosi pada peralatan yang digunakan (Khoiyangbam, 2011).

D. Kondisi Optimum Biogas

Hal mendasar yang perlu diperhatikan sebelum memulai penelitian adalah percobaan perlu dirancang dengan baik karena hasil dan kesimpulan yang diperoleh dari percobaan sangat bergantung pada cara mengumpulkan dan menganalisa data (Montgomery, 2017).

Untuk menghasilkan biogas secara optimal dibutuhkan beberapa kondisi, variabel, atau faktor pendukung. Pendekatan tradisional satu yang menerapkan satu faktor/variabel pada satu waktu (*single factor experiment*) tidak tepat digunakan karena hanya mampu memberikan kesimpulan terkait dengan satu faktor yang diamati (Fajrin et al., 2017) dan tidak dapat mengevaluasi pengaruh berbagai faktor secara bersamaan dalam satu waktu sehingga dapat mempengaruhi waktu dan tenaga peneliti (Hong & Haiyun, 2010).

Metode statistik adalah salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk menjawab permasalahan tersebut karena lebih sederhana dan tidak membutuhkan waktu lama. Disain eksperimen adalah salah satu metode statistik yang dapat digunakan sebagai cara untuk memperbaiki dan meningkatkan kualitas produk. Definisi disain eksperimen adalah suatu metode pengujian atau rangkaian pengujian yang dilakukan dengan mengatur variabel bebas (input) suatu proses sehingga penyebab perubahan dari respon (output) dapat diketahui. Tujuan utama penggunaan disain eksperimen, yaitu: 1) memilih variabel bebas yang dapat berpengaruh terhadap hasil (respon), 2) memilih variabel bebas yang membuat respon menghampiri nilai yang diharapkan (target), dan 3) memilih variabel bebas yang menghasilkan nilai respon paling kecil (minimum) (Irawan & Astuti, 2006).

Langkah-langkah penting yang perlu diperhatikan dalam menggunakan disain eksperimen agar hasil (respon) yang diinginkan tercapai menurut (Irawan & Astuti, 2006), antara lain:

1. Mengenali permasalahan dengan melakukan identifikasi masalah merupakan tahapan awal yang penting dalam suatu eksperimen yaitu dengan membuat pernyataan tepat yang dapat

mewakili permasalahan agar diperoleh metode penyelesaian yang tepat dan diperoleh kesimpulan yang dapat menjawab semua permasalahan yang ada.

2. Memilih dan menentukan variabel respon. Variabel respon adalah variabel dependen yang dipengaruhi oleh level faktor atau kombinasi level faktor. Variabel respon dapat diukur dengan menggunakan statistik rata-rata dan standar deviasi.
3. Menentukan faktor dan level dalam eskperimen. Selain itu perlu juga mengetahui cara menentukan dan mengatur faktor serta cara mengukurnya. Tahapan ini membutuhkan kemampuan lebih dalam agar dapat memahami masalah yang akan diteliti sehingga faktor dan level yang ditentukan hasilnya menghampiri nilai yang diinginkan.
4. Pemilihan metode disain eksperimen, merupakan tahapan utama dalam disain eksperimen. Metode disain eksperimen yang dipilih disesuaikan dengan tujuan penelitian dan permasalahan yang ada. Metode disain eksperimen antara lain: disain acak sederhana, disain blok, disain factorial, disain latin, disain Nested, disain Taguchi, disain permukaan respon (*respon surface methodology*), dan lain-lain (Montgomery, 2017).
5. Melaksanakan eksperimen dengan jalan mengamati proses yang berlangsung agar eksperimen berjalan sesuai rencana.
6. Melakukan analisis data sesuai dengan metode yang digunakan. Salah satu tahapan analisis data dalam disain eksperimen adalah analisis residual dan uji kesesuaian model. Hasil analisis dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dan pernyataan yang tepat.
7. Membuat keputusan berdasarkan hasil analisis data yang telah dilakukan.

Cara yang saat ini dipergunakan secara luas untuk mngetahui pengaruh variabel secara individu maupun secara bersamaan (interaksi) dalam memprediksi respon yang diperoleh

secara optimal adalah metode permukaan respon (*Respon Surface Methodology*) (Fajrin et al., 2017; Hong & Haiyun, 2010). Produksi biogas menggunakan metode *Respon Surface Methodology* (RSM) sebagai pendekatan untuk melihat pengaruh variabel bebas (faktor) secara individu dan secara bersama (interaksi) dalam proses. Beberapa tahapan yang dilakukan dalam RSM, yaitu (Irawan & Astuti, 2006):

1. Membuat desain *respon surface* dalam aplikasi Minitab. Desain yang dapat dipilih adalah *Central Composite Design* atau *Box-Behnken Design*.
2. Menemukan fungsi hubungan antara variabel respon (dependen) dan variabel bebas (independent) yang tepat. Hubungan antara variabel dependen dan variabel independent seringkali tidak diketahui oleh peneliti.
3. Melakukan analisis *respon surface* menggunakan regresi linear analisis varians (ANOVA) sesuai dengan langkah-langkah dalam aplikasi yang digunakan.
4. Interpretasi output *respon surface*. Output hasil ANOVA ditampilkan dalam bentuk tabel yang memuat penjelasan tentang hasil taksiran parameter model, tabel ANOVA digunakan untuk melihat nilai kesesuaian model dengan data, dan unusual observation (pengamatan yang tidak biasa). Tahapan dalam analisis output, antara lain: a) melihat signifikansi model berdasarkan nilai signifikansi dari hasil ANOVA untuk melihat model persamaan linear, kuadratik, atau non linear. b) Melihat hasil pengujian *Lack of Fit* untuk memutuskan kecukupan model yang dibuat telah sesuai dengan data. c) Melakukan analisis residual untuk mengetahui model regresi yang dibuat sesuai dengan data dengan memeriksa kenormalan plot residual taksiran model dan order model titik-titik yang membentuk pola acak.

5. Membuat model respon berdasarkan plot *contour* dari variabel dependen yang merupakan fungsi hubungan dari setiap variabel yang mempengaruhi respon. Model respon dibuat dalam bentuk 3 dimensi (*respon surface plot*) dan 2 dimensi (*contour surface plot*).

Setelah kondisi produksi biogas optimum diperoleh dari hasil disain eksperimen, selanjutnya dilakukan pengamatan terhadap laju produksi biogas dalam digester. Kecepatan produksi biogas dalam digester sistim batch diasumsikan selalu sebanding dengan kecepatan pertumbuhan spesifik mikroorganisme metanogenik sehingga kecepatan produksi biogas akan mengikuti persamaan Gompertz (Budiyono et al., 2010). Persamaan ini adalah model matematis yang digunakan untuk pengamatan time series, dimana pertumbuhan pada saat awal adalah paling lambat dan merupakan akhir waktu pengamatan. Bentuk umum persamaan matematika tersebut sebagai berikut:

$$y(t) = ae^{be^{ct}} \quad (1)$$

Dimana: a = asimtot atas
 c = laju pertumbuhan
 b, c = konstanta negatif
 e = bilangan euler (2,71828)

Persamaan (1) disusun ulang menjadi: $y = a \cdot \exp[-\exp(b - ct)]$ (2)

Parameter a dalam persamaan Gompertz dapat diganti dengan A sehingga membedakan bentuk persamaan Gompertz dengan hasil modifikasi menghasilkan persamaan:

$$P = A \cdot \exp \left\{ -\exp \left[\frac{Ue}{A} (L - t) + 1 \right] \right\} \quad (3)$$

Dimana:
 P : akumulatif produksi biogas spesifik (mL/g.TS)
 A : produksi biogas maksimal (mL/g.TS)
 U : kecepatan produksi biogas maksimum (mL/gTS.hari)
 L : waktu minimum terbentuknya biogas (hari)

t : waktu kumulatif untuk produksi biogas (hari)
 e : konstanta matematika (2,71828)

Penggunaan model matematis Gompertz termodifikasi untuk menentukan laju produksi biogas dilakukan karena:

1. Grafik akumulasi volume biogas terhadap lama waktu pengamatan membentuk kurva S dengan jenis sigmoidal (Chala et al., 2019; Zhu et al., 2019).
2. Persamaan Gompertz termodifikasi merupakan persamaan dasar dan berhubungan langsung dalam menjelaskan produksi biogas dengan sistim batch (Budiyono et al., 2010). Persamaan Gompertz termodifikasi dapat digunakan untuk menjelaskan proses anaerobik satu tahap atau dua tahap.
3. Model Gompertz termodifikasi adalah model regresi non linear yang menunjukkan kondisi fase lag dan kecepatan produksi biogas optimum (Pramanik et al., 2019)
4. Persamaan Gompertz termodifikasi telah digunakan secara luas pada penelitian-penelitian tentang biogas dan hasilnya memberikan error terendah dengan tingkat kesesuaian dengan data yang tinggi (Deepanraj et al., 2015; Zhu et al., 2019)

E. Persepsi Masyarakat

Indonesia mempunyai sumber energi alternatif baru terbarukan yang sangat potensial, dan bisa diaplikasikan saat ini dalam skala mikro antara lain: bioetanol sebagai untuk menggantikan bensin, biodiesel untuk menggantikan solar, tenaga panas bumi, tenaga surya, mikrohidro, tenaga angin, hingga limbah organik dan limbah pertanian juga dapat digunakan untuk menghasilkan listrik. Hal ini ditunjang dengan kebijakan yang dikeluarkan oleh pemerintah yaitu dalam bentuk konservasi energi, diversifikasi energi, dan intensifikasi energi.

Konservasi energi dilakukan untuk mendukung penggunaan energi secara efisien tanpa mengurangi penggunaan energi yang benar-benar diperlukan. Diversifikasi energi dilakukan melalui usaha penganekaragaman, pengadaan dan penggunaan berbagai sumber energi untuk mengoptimalkan pengadaan energi, yaitu penggunaan energi dari sumber energi tidak terbarukan ke bentuk sumber energi terbarukan. Intensifikasi energi dilakukan melalui usaha menemukan sumber-sumber energi baru sehingga dapat menambah cadangan energi untuk digunakan dalam menghasilkan energi listrik (Lubis, 2011).

Potensi sumber energi terbarukan yang dimiliki Indonesia adalah energi panas bumi, energi air, bioenergi (bioetanol, biodiesel, biomassa/biogas), energi laut, sel bahan bakar (*fuel cell*), energi angin, energi surya (fotovoltaik dan termal), panas bumi, dan energi nuklir (Lubis, 2011). Terdapat lima jenis teknologi energi yang paling banyak diterapkan di berbagai negara maju dan berkembang, yaitu: energi angin di darat, angin lepas pantai, energi surya, biomassa/biogas, dan nuklir. Studi yang dilakukan oleh (Ligus, 2017) berdasarkan konsep pembangunan berkelanjutan menunjukkan bahwa prioritas dimensi lingkungan dan ekonomi paling penting, diikuti oleh aspek sosial. Analisis terhadap dampak kesejahteraan sosial masyarakat digunakan untuk menentukan peringkat teknologi yang memberikan emisi terendah. Hasil studi menunjukkan peringkat teknologi yang menghasilkan emisi terendah secara berurutan adalah: fotovoltaik, biomassa/biogas, energi angin di darat, angin di lepas pantai, dan nuklir.

Salah satu teknologi energi baru terbarukan yang telah dikembangkan di beberapa wilayah di Indonesia adalah biomassa/biogas. Hal ini ditunjang dengan sumberdaya alam yang dimiliki daerah masing-masing terutama sektor pertanian dan perkebunan. Sagu sebagai

salah satu tanaman perkebunan juga menjadi sumber potensial bagi energi baru terbarukan karena kandungan selulosa yang cukup tinggi pada batangnya. Bagian yang dimanfaatkan dari batang sagu saat ekstraksi sagu menjadi tepung hanya sekitar 25-30%, sisanya sekitar 70-75% larut dan terbuang dalam bentuk residu sagu yang menjadi limbah dalam bentuk padatan yaitu ampas maupun air limbah. Konsentrasi selulosa dalam bentuk pati yang tidak terekstraksi yang cukup tinggi dalam limbah mengeluarkan bau busuk dan menyebabkan lingkungan sekitarnya menjadi terganggu.

Keberhasilan produksi dan pengelolaan biogas dapat dilihat dari berbagai faktor, yaitu faktor ekonomi, sosial, dan lingkungan. Faktor ekonomi dapat dilihat dari peningkatan kesejahteraan masyarakat sekitar, yaitu kemampuan mengurangi pengeluaran rumah tangga dengan mengganti penggunaan energi sehari-hari dengan biogas. Selain itu, proses produksi biogas juga menghasilkan produk sampingan berupa pupuk organik kualitas tinggi sehingga dapat meningkatkan hasil-hasil pertanian lainnya. Faktor sosial dapat dilihat dari kemudahan biogas dimanfaatkan oleh rumah tangga sedangkan faktor lingkungan memberikan dampak positif berupa pengurangan limbah pertanian yang dibuang ke perairan yang dapat menyebabkan pencemaran tanah serta bau yang tidak sedap yang ditimbulkan.

Efisiensi penggunaan teknologi biogas bergantung pada biaya investasi, biaya operasional pabrik biogas, dan produksi gas metana optimum yang dihasilkan. Hasil analisis biaya manfaat pada pabrik biogas dengan kapasitas digester 9.000 m³ untuk populasi sebanyak 118.912 m³/tahun dan biogas yang digunakan per kapita/tahun adalah 0,0099 m³/orang/hari menghasilkan 47.450 kg biogas yang setara dengan pemakaian LPG per tahun. Pabrik biogas berpotensi menghemat biaya untuk pembersihan limbah hingga 7.207 kali proses/tahun

dengan biaya 468.440 dolar/tahun ketika pabrik beroperasi dengan kapasitas penuh. Proses produksi biogas juga mampu menghemat penggunaan air dengan pemakaian daur ulang (air limbah yang diolah kembali, 60% air dari limbah domestik) sebanyak 64.861 m³/tahun dengan biaya 49.806 dolar. Instalasi pabrik biogas mampu mengganti 100% penggunaan septik tank dengan biaya 230 m³/unit (Mohammed et al., 2017),.

Penelitian yang dilakukan oleh (Harihastuti, 2015) pada industri kecil tahu dalam melihat peluang air limbah industri tahu yang diolah menjadi sumber energi terbarukan. Dari hasil valuasi ditemukan bahwa potensi konversi energi biogas memberikan hasil sebesar 1.350.650 liter/hari sehingga dapat menjadi sumber energi terbarukan skala kecil. Pemanfaatan energi dari biogas untuk memanaskan air dan pembangkit uap untuk pemasakan bubur kedelai setiap bulannya sebesar Rp. 127.680.000 sehingga biaya operasional produksi dapat dihemat. Pembelian serbuk gergaji dapat dihilangkan dengan melakukan substitusi pembelian solar untuk mesin penggerak gilingan dapat mengurangi biaya hingga Rp 57.960.000. Konversi air limbah industri tahu menjadi biogas sebagai sumber energi alternatif menghasilkan nilai tambah secara ekonomi pada industri tahu tersebut. Sedangkan aspek lingkungan memberikan nilai tambah antara lain mengurangi pembentukan gas rumah kaca dan pemanasan global. Potensi air limbah industri tahu tersebut dapat menjadi sumber energi terbarukan dari sektor limbah industri.

Indonesia memiliki 1128 juta ha atau setara dengan 51,3 % dari 2201 juta ha areal sagu dunia. Akan tetapi tanaman sagu tersebut masih belum optimal dimanfaatkan dan lebih difokuskan kepada pengambilan pati untuk dijadikan bahan makanan. Sisa dari proses pengolahan tersebut berupa ampas sagu tidak dimanfaatkan dan di buang langsung ke

lingkungan. Limbah yang dihasilkan belum mendapat perhatian masyarakat maupun pemerintah daerah setempat dan tidak dikelola dengan baik sehingga masih mencemari lingkungan. Sekitar 17-25% sisa pengolahan berupa serat batang dan sekitar 75-83% berupa ampas sagu. Ampas sagu yang dihasilkan akan terus bertambah seiring dengan produksi pengolahan pati sagu yang dilakukan secara terus menerus.

Penggunaan energi dan biogas yang dihasilkan digunakan untuk menggambarkan kesetaraan energi yang digunakan sehari-hari oleh petani dengan biogas yang dihasilkan setiap hari. Nilai kesetaraan penggunaan energi dan biogas yang dihasilkan dibandingkan dengan data sekunder, dapat dilihat pada tabel 4. Sedangkan nilai konversi terhadap energi listrik adalah 1 m³ biogas dapat menggerakkan energi listrik sebesar 11,17 kWh (Sørensen, 2007).

Tabel 4. Nilai kesetaraan biogas dengan beberapa jenis bahan bakar

Biogas	Bahan bakar lain
1 m ³	Elpiji 0,46 kg Minyak tanah 0,62 liter Minyak solar 0,52 liter Bensin 0,80 liter Gas kota 1,50 m ³ Kayu bakar 3,50 kg

Sumber: (Wahyuni, 2013)

Potensi yang dimiliki tanaman sagu cukup besar, baik potensi pati, luasan, dan sebarannya. Seluruh bagian tanaman sagu dapat bermanfaat dan memiliki nilai ekonomi yang tinggi. Selain nilai ekonomi, keberadaan tanaman sagu mempunyai nilai sosial budaya dan ekologi yang penting (Bappeda Kota Palopo, 2016), antara lain:

1. Sumber bahan makanan dan industri. Sagu memiliki potensi yang sangat besar untuk dikembangkan baik sebagai sumber bahan pangan dan bahan baku industri. Sebagai sumber pangan, sagu sangat potensial untuk dikembangkan sebagai bahan pangan

alternatif pengganti beras. Sagu menghasilkan pati kering hingga 25 ton per hektare per tahun, melebihi produksi pati beras atau jagung yang masing-masing hanya 6 ton dan 5,5 ton per hektare per tahun. Setiap batang dapat menghasilkan sekitar 200 kg tepung sagu basah per tahun. Tepung sagu juga dapat digunakan secara luas sebagai substitusi dalam pembuatan makanan lain, seperti: mie, roti, biskuit, kue, makanan penyedap, dan berbagai jenis minuman sirup berkadar fruktosa tinggi. Sementara untuk bahan baku industri, sagu dapat digunakan dalam pembuatan lem, baterai, keramik, kosmetik, insulasi cat, plywood, tekstil, asam sitrat, ethanol, asam laktat (plastik organik), aseton, larutan injeksi dekstrose, penisilin, antibiotika, serta sumber bahan baku etanol yang sangat terbuka dan menjanjikan.

2. Sagu sebagai tanaman yang adaptif. Kemampuan sagu untuk beradaptasi pada lahan marginal dan lahan kritis cukup tinggi yang tidak memungkinkan pertumbuhan optimal bagi tanaman pangan dan tanaman perkebunan. Pohon sagu dapat tumbuh pada lahan dan cuaca yang ekstrim. Karakteristik bioekologi sagu ini, merupakan potensi sangat berarti dalam memanfaatkan lahan marginal dan lahan kritis yang cukup luas di Indonesia, menunjang ketahanan pangan dalam negeri dan sumber bahan baku industri serta dapat berperan sebagai tanaman konservasi.
3. Sagu sebagai tanaman multifungsi, dimana hampir semua bagian tanaman mempunyai manfaat tersendiri. Daun sagu dapat dimanfaatkan untuk atap, keranjang atau tikar, sedangkan kulit batang dan tangkai daun dapat digunakan untuk wadah pengendapan sagu atau tempat air. Batang kayu dapat digunakan sebagai bahan bangunan, tiang dan balok jembatan, serta sebagai bahan bakar. Tangkai daun dapat dibuat menjadi bilik untuk

dinding atau pagar, serat dari batangnya dapat dijadikan sebagai bahan pembuatan papan partikel, sedangkan ampas sagu dapat dimanfaatkan untuk pakan ternak dan media penyemaian jamur makanan.

4. Sumber energi alternatif yang potensial. Perkembangan kebutuhan akan energi alternatif yang ramah lingkungan, memberi peluang bagi pemberdayaan dan pengembangan sagu pada lahan rawa, hutan sekunder dan lahan kritis untuk menghasilkan produk sagu sebagai sumber energi bioetanol, dan juga berfungsi untuk mengurangi pemanasan global. Teknologi fermentasi mampu memfermentasi keseluruhan batang sagu tanpa penepungan sehingga sangat efisien dan sangat murah untuk menghasilkan bioetanol. Produk bioetanol dapat dihasilkan dari pati sagu, juga dari bagian serat lewat masak tebang, dan limbah industri sagu yang dihasilkan sehingga berpeluang untuk mengoptimalkan pemanfaatan seluruh bagian tanaman sagu.
5. Sagu sebagai penyelamat lingkungan karena dapat menyerap gas rumah kaca (CO_2) yang dikeluarkan lahan gambut ke udara. Nilai rata-rata laju fotosintesis tanaman sagu sebesar $22 \text{ mg CO}_2/\text{dm}^2/\text{jam}$. Jumlah CO_2 yang dapat diserap oleh tanaman sagu sebesar 240ton $\text{CO}_2/\text{ha}/\text{tahun}$. Indonesia mempunyai lahan sagu seluas 1,4 juta ha akan mampu menyerap CO_2 sebesar 330 juta ton per tahun. Kompensasi serapan melalui usaha tanaman sagu ini dapat mendukung mitigasi perubahan iklim. Lahan sagu juga dapat menampung air dari lingkungan sekitarnya, melindungi sungai akibat pencucian materi dari daerah ketinggian di kiri kanan sungai, serta membantu infiltrasi (penyerapan) aliran air dan air hujan masuk kedalam tanah, mengurangi volume air di permukaan dan mencegah banjir. Tanaman sagu

juga berfungsi menjaga keberlangsungan hidup manusia karena keberadaannya menjadi tempat sumber mata air.

6. Sagu sebagai pemersatu sosio-kultural masyarakat. Beberapa daerah penghasil sagu termasuk di Tana Luwu, keberadaan sagu tidak hanya sebagai bahan pangan dan manfaat ekonomi lainnya dalam rangka kelestarian hidup, tetapi sagu memberi nilai pada kehidupan sosial budaya masyarakat. Ini dapat dilihat pada aktivitas penebangan dan pengolahan pohon sagu yang masih dilakukan secara bersama-sama atau gotong royong. Selain itu, salah satu makanan yang khas di daerah ini (kapurung) dapat menjadi alat integrasi sosial bagi kehidupan masyarakat.

Untuk memaksimalkan potensi sagu tersebut, diperlukan peran semua pihak terutama masyarakat dan petani pengolah sagu. Keberhasilan mengolah potensi sagu bergantung pada kondisi sosial ekonomi masyarakat terutama pengolah sagu sehingga perlu membentuk persepsi masyarakat yang dapat mempengaruhi pemikiran dan tingkah laku dalam mengolah sagu. Persepsi adalah suatu pandangan, pemahaman, dan penafsiran individu terhadap informasi yang diperoleh dari lingkungan terhadap objek tertentu sehingga menghasilkan respon terhadap objek tersebut (Arifin et al., 2017). Persepsi yang terbentuk dipengaruhi oleh beberapa hal, yaitu: 1) wujud rangsangan yang menghasilkan ukuran, perasaan, kedekatan, dan ketajaman rasa; 2) pandangan yang berbeda dalam hal kecerdasan, ketertarikan, dan emosional dipengaruhi oleh karakter individu yang berbeda; 3) kelompok masyarakat yang dapat memberikan pengaruh terhadap perbuatan dan tingkah laku seseorang, dan 4) kebudayaan dan kebiasaan yang berbeda terhadap suatu objek menghasilkan pendapat yang berbeda (Yuwono, 2006).

Persepsi setiap individu dapat terbentuk berdasarkan informasi yang diterimanya kemudian ditafsirkan secara berbeda berdasarkan karakteristik sosial ekonomi masing-masing. Karakteristik sosial ekonomi masyarakat yang dikaji adalah usia, tingkat pendidikan, jenis kelamin, jenis pekerjaan, penghasilan, jumlah tanggungan keluarga, lama domisili, dan status kependudukan pada suatu wilayah untuk mengetahui dan menggambarkan karakteristik sosial ekonomi masyarakat pengolah sagu, persepsi masyarakat dalam memanfaatkan limbah pengolahan sagu, bagaimana hubungan karakteristik sosial ekonomi dengan persepsi masyarakat terhadap pemanfaatan limbah pengolahan sagu, serta bagaimana kesediaan masyarakat dalam menerima keberlanjutan teknologi baru jika diterapkan di lokasi pengolahan sagu. Karakteristik sosial ekonomi masyarakat berkaitan dengan kemampuan masyarakat dalam memanfaatkan tanaman sagu sehingga dapat menggambarkan perbuatan dan pemahaman terhadap penafsiran informasi yang mereka peroleh (Manyamsari & Mujiburrahmad, 2014).