

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Feses Sapi Perah

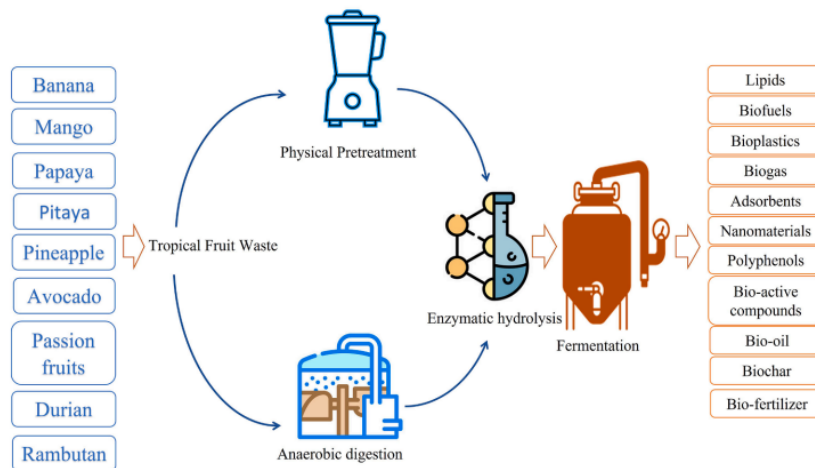
Feses sapi perah (FSP) merupakan salah satu limbah yang diproduksi oleh sapi perah dan kaya akan bahan organik. Feses sapi perah jika tidak dikelola dengan baik akan menimbulkan masalah lingkungan, mulai dari pencemaran air dan tanah, hingga pelepasan gas metana (CH_4) dan dinitrogen oksida (N_2O) ke atmosfer, yang merupakan gas rumah kaca dan berkontribusi pada pemanasan global (Pinos-Rodríguez *et al.*, 2012), (Drewry *et al.*, 2018). Disisi lain, FSP berpotensi sebagai substrat biogas yang merupakan sumber energi terbarukan (Imeni *et al.*, 2020). Secara alami, FSP memiliki kadar air yang tinggi, mengandung bahan organik dan kaya akan mikroorganisme, termasuk bakteri hidrolitik, asetogenik, dan mikroorganisme metanogenik yang bermanfaat untuk memulai dan menopang proses fermentasi anaerob (Chávez-Fuentes *et al.*, 2017). Namun, pemanfaatan FSP sebagai substrat tunggal (*mono-substrate*) menghadapi beberapa tantangan, salah satunya adalah rasio karbon terhadap nitrogen (C/N) yang rendah umumnya adalah 20:1, sementara rasio ideal untuk fermentasi anaerob adalah 20-30:1 (Wang *et al.*, 2014). Selain itu, sebagian karbon FSP terikat dalam bentuk lignoselulosa yang kompleks dan sulit dihidrolisis, proses hidrolisis yang lambat menjadi tahap pembatas laju yang berakibat pada laju produksi biogas yang rendah dan waktu retensi hidrolik yang panjang. Akibatnya produksi metana yang dihasilkan dari FSP sebagai *mono-substrate* seringkali tidak optimal dan kurang efektif (Mirmohamadsadeghi *et al.*, 2021).

Penelitian yang dilakukan oleh Sutaryo *et al.*, (2022) perlakuan FSP sebagai *mono-substrate* menghasilkan produksi metana yang lebih rendah, jika dibandingkan

dengan dikombinasikan dengan *Pistia stratiotes*. Untuk mengatasi permasalahan di atas, berbagai metode telah dilakukan, salah satunya melalui pendekatan fermentasi kombinasi (*co-digestion*), *co-digestion* adalah proses pencampuran dua atau lebih jenis substrat di dalam satu digester. Tujuan dari *co-digestion* yaitu meningkatkan performa proses fermentasi anarobik secara keseluruhan. Adapun keuntungan *co-digestion* yaitu menyeimbangkan nutrisi dalam substrat, meningkatkan muatan organik (*organic loading rate/OLR*), dan mengurangi senyawa penghambat atau inhibitor (Ahmad *et al.*, 2024).

2.2. Limbah Buah Tropis

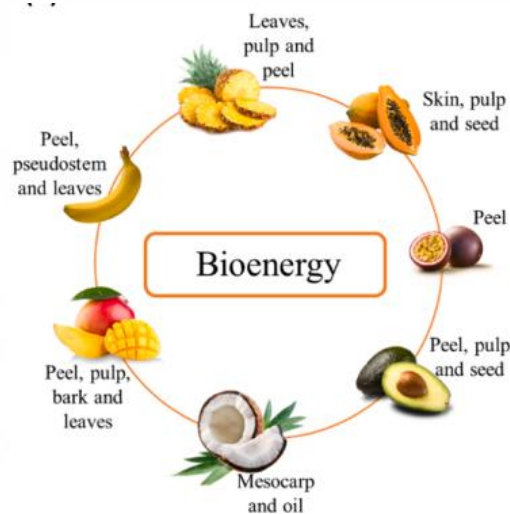
Limbah buah tropis (LBT) merupakan salah satu jenis limbah organik yang berasal dari buah-buahan tropis dan paling banyak diproduksi di negara-negara tropis, termasuk Indonesia. Umumnya, LBT terdiri dari kulit, biji, ampas, dan bagian tidak termakan lainnya yang seringkali dibuang di tempat pembuangan akhir (TPA). Minimnya pengolahan LBT, membuat LBT menjadi salah satu sumber masalah lingkungan, selain dapat mencemari lingkungan, juga berdampak buruk bagi kesehatan manusia. Namun demikian, berbagai penelitian yang telah dilakukan mengidentifikasi bahwa LBT kaya akan kandungan bahan organik, dan biomassa lignoselulosa sehingga berpotensi diolah menjadi produk yang bernilai tambah, salah satunya biogas (Gambar 2). Pemanfaatan LBT melalui konversi bioenergi, selain dapat mengolah limbah yang terproduksi juga dapat menjadi salah satu alternatif menciptakan sumber energi terbarukan melalui pengolahan limbah. Konversi bioenergi melalui fermentasi anarobik untuk menciptakan biogas merupakan salah satu pendekatan yang paling tepat untuk mengolah LBT (Gambar 3) (Cádiz-Gurrea *et al.*, 2020; Ding *et al.*, 2023).



Gambar 2. Pemanfaatan LBT untuk menghasilkan produk bernilai tambah (Ding *et al.*, 2023)

Beberapa penelitian yang telah dilakukan telah dirangkum dalam studi literatur, dan telah membuktikan kelayakan penggunaan berbagai jenis LBT untuk produksi biogas. Penelitian yang telah dilakukan oleh Muenmee & Prasertboonyai, 2021 berhasil mengkombinasikan limbah makanan dan LBT yaitu kulit durian, buah naga, dan nanas dalam berbagai rasio (mono-substrat dan *co-substrate*) untuk meningkatkan produksi metana, penelitian yang lain dilakukan oleh Purwasih *et al.*, (2025) berhasil memanfaatkan limbah biji pepaya sebagai mono-substrat dan *co-substrate* biogas, selain itu pemanfaatan LBT lain yaitu mangga sebagai mono-substrat dan *co-substrate* biogas juga dilakukan oleh Musser *et al.*, (2025). Dari berbagai penelitian yang telah dilakukan, penggunaan LBT terbukti berpotensi meningkatkan produksi metana. Selanjutnya, Potensi LBT sebagai substrat biogas juga didasari oleh bagian limbah dan komposisi bahan organiknya, menurut Ding *et al.*, (2023), LBT mengandung biomassa lignoselulosa yang tinggi akan karbohidrat kompleks seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Bahan organik tersebut dapat dimanfaatkan oleh mikroorganisme anaerobik menjadi komponen-komponen gula sederhana yang kemudian diubah menjadi biogas. Lebih lanjut dijelaskan, kandungan selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang terkandung serta karakteristik yang

berbeda dalam berbagai jenis LBT, akan berpengaruh pada produksi metana yang berbeda-beda.



Gambar 3. Pemanfaatan LBT sebagai bioenergi (Cádiz-Gurrea *et al.*, 2020)

Penelitian yang dilakukan oleh Purwasih *et al.*, (2025), menyebutkan kandungan bahan organik limbah pepaya yaitu biji pepaya yaitu kadar air, protein kasar, lemak kasar, serat kasar, karbohidrat berturut-turut yaitu 10,52%, 27,29%, 28,62%, 27,27%, dan 9,55%. Sementara limbah lain yaitu kulit durian memiliki kandungan air 94,4%, *total solid* (TS) dan *volatile solid* (VS) 29,4% dan 27,7%, kulit nanas mengandung selulosa dan hemiselulosa 21,98% dan 74,96%, sementara kulit dan biji rambutan memiliki TS dan kadar abu berturut-turut 6% dan 35%, 1,2% dan 2,9% (Zamri *et al.*, 2020). Keberagaman bahan organik yang terkandung pada masing-masing bagian limbah atau jenis buah dapat mempengaruhi produksi metana yang dihasilkan. Dijelaskan oleh Gunaseelan, (2004) dan Anika & Akin-Osanaiye, (2020), berbagai jenis buah memiliki potensi metana yang berbeda, misalnya kulit mangga, jeruk, dan delima busuk menunjukkan hasil metana yang lebih tinggi, selain itu limbah semangka menghasilkan metana yang lebih tinggi jika dibandingkan limbah mangga dan pepaya. Bagian buah yang berbeda juga menghasilkan jumlah metana yang berbeda.

2.3. Biogas

Biogas merupakan produk utama dari fermentasi anaerobik dan merupakan campuran dari metana (CH_4) 35-75%, karbon dioksida (CO_2) 25-65%, dan *trace gas* seperti nitrogen (N_2), hidrogen sulfida (H_2S), hidrogen (H_2), oksigen (O_2), dan amonia (NH_3) yang dihasilkan dari proses fermentasi anaerobik (Yentekakis & Goula, 2017; Singh *et al.*, 2023). Proses fermentasi anaerob terdiri dari empat tahap yaitu hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, dan mikroorganisme metanogenesis. Hidrolisis merupakan tahap dimana senyawa kompleks seperti karbohidrat, protein, dan lemak dipecah menjadi monomernya seperti gula, asam amino, dan asam lemak. Asidogenesis merupakan tahap kedua dimana produk yang telah dihidrolis diubah menjadi *volatile fatty acids* (VFAs), alkohol, hidrogen, dan karbon dioksida. Asetogenesis adalah tahap ketiga yaitu VFA dan alkohol diubah menjadi asam asetat, hidrogen, dan karbon dioksida, dan tahap terakhir yaitu mikroorganisme metanogenesis, asam asetat, hidrogen, dan karbon dioksida diubah menjadi metana dan karbon dioksida (Induchoodan *et al.*, 2022).

Pada setiap tahap di atas, mikroorganisme yang berperan berbeda namun saling terkait dan memiliki kebutuhan lingkungan yang berbeda (Chávez-Fuentes *et al.*, 2017). Mikroorganisme dalam proses fermentasi anaerob memiliki tugas untuk memecah bahan organik hingga akhirnya diubah menjadi biogas (Musser *et al.*, 2025). Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi produksi biogas, yaitu temperatur, pH, komposisi substrat, *hydraulic retention time* (HRT), dan *organic loading rate* (OLR).

2.4. Metana

Metana (CH_4) merupakan gas yang tidak berwarna, tidak berbau, dan mudah terbakar, merupakan alkana paling sederhana dan merupakan penyusun utama gas alam. Metana merupakan gas rumah kaca yang kuat 25 kali lebih besar dibandingkan karbon

dioksida, berkontribusi terhadap pemanasan global (Bolt, 2023). Metana diproduksi melalui fermentasi anaerobik bahan organik oleh *archaea mikroorganisme metanogenic* di lingkungan dengan kadar oksigen yang rendah. Proses fermentasi bersama menggunakan kombinasi substrat dapat meningkatkan produksi metana hingga 170% (Lovanh *et al.*, 2023). Metana digunakan sebagai bahan bakar rumah tangga dan dalam industri digunakan untuk menghasilkan bahan kimia seperti metanol dan etilena. Metana juga dapat dikonversi menjadi listrik dan panas melalui pembangkit biogas (Béline *et al.*, 2010; Bolt, 2023).

2.5. Variabel-variabel Stabilitas Proses Fermentasi Anaerobik

Keberhasilan proses fermentasi anaerobik tidak hanya diukur dari volume metana yang dihasilkan, tetapi dari stabilitas dan ketahanan sistem dalam proses fermentasi anaerobik yang juga merupakan hal yang penting dan berpengaruh pada jangka panjang. Stabilitas proses fermentasi anaerobik sangat bergantung pada keseimbangan di dalam digester, hal ini dapat dipantau melalui beberapa variabel kunci. Diantara variabel tersebut adalah konsentrasi *volatile fatty acids* (VFA), konsentrasi *total ammonia nitrogen* (TAN), dan nilai derajat keasaman (pH).

2.5.1. Konsentrasi *Volatile Fatty Acids*

Volatile fatty acids (VFA) dihasilkan selama proses biodegradasi bahan organik terutama tahap asetogenesis dan berfungsi sebagai substrat utama bagi bakteri asetogenik dan *archaea mikroorganisme metanogenik* pada tahap berikutnya. *Volatile fatty acids* berfungsi sebagai zat antara pada proses fermentasi anaerobik. Selama proses asidogenesis, bahan organik kompleks dipecah menjadi senyawa yang lebih sederhana, termasuk VFA yang selanjutnya digunakan oleh bakteri asetogenik dan arkea mikroorganisme

metanogenik dalam tahap fermentasi selanjutnya (Zygmunt & Banel, 2009; Worwag & Kwarciak-Kozłowska, 2019). Secara spesifik, bakteri asetogenik mengubah VFA menjadi asetat, hidrogen, dan karbon dioksida, yang kemudian digunakan oleh arkea mikroorganisme metanogenik untuk menghasilkan metana (Wu *et al.*, 2014).

Dalam kondisi yang seimbang, laju konsentrasi atau produksi VFA berbanding lurus dengan laju konsumsinya, sehingga konsentrasi VFA di dalam digester tetap stabil dan rendah. Secara umum, konsentrasi VFA dianggap aman jika total nilainya adalah 2.000 mg/L (Wang *et al.*, 2009; Mu *et al.*, 2023). Namun demikian, konsentrasi VFA yang tinggi juga dapat memberikan efek inhibisi sehingga menghambat aktivitas mikroorganisme metanogen yang menyebabkan penurunan produksi biogas dan berpotensi kegagalan sistem. Akumulasi VFA terjadi ketika *overloading* bahan organik atau terdapat senyawa toksik, laju VFA dapat melampaui laju konsumsinya sehingga menyebabkan pengasaman pada digester (Lu *et al.*, 2020; Gao *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2024).

2.5.2. Konsentrasi Total Ammonia Nitrogen

Total ammonia nitrogen (TAN) merupakan jumlah dari dua bentuk amonia yang ada dalam larutan, yaitu amonium terionisasi (NH_4^+) dan amonia bebas yang tidak terionisasi (NH_3). Nitrogen adalah nutrisi penting bagi pertumbuhan mikroorganisme, namun pada konsentrasi yang tinggi justru menjadi inhibitor yang kuat. Keseimbangan NH_4^+ dan NH_3 dipengaruhi oleh pH dan suhu, kenaikan pH dan suhu akan meningkatkan proporsi NH_3 , NH_3 merupakan bentuk paling beracun yang dapat berdifusi melintasi membran sel dan menyebabkan perubahan pH intraseluler serta mengganggu jalur enzimatik (Alonso & Camargo, 2006; Lama, 2013). Konsentrasi TAN yang dapat ditoleransi bervariasi, namun beberapa penelitian menyebutkan 3.000 mg/L sudah mulai

memberikan efek inhibisi. Dijelaskan lebih lanjut bahwa konsentrasi TAN yang melebihi 4.000 mg/L akan menyebabkan produksi metana berkurang sebesar 38%, dan 5.000 mg/L akan menurunkan produksi metana 55% (Meng *et al.*, 2018).

2.5.3. Derajat Keasaman

Derajat keasaman (pH) merupakan ukuran logaritmik dari konsentrasi ion hidrogen dalam suatu larutan, merupakan salah satu parameter yang penting pada proses fermentasi anaerobik karena berfungsi sebagai indikator proses utama, proses produksi asam (asidogenesis) dan konsumsi asam (asetogenesis dan mikroorganisme metanogenesis). Setiap tahapan fermentasi anaerobik sensitif terhadap perubahan pH, yang dapat berdampak signifikan terhadap efisiensi dan stabilitas proses (Zhao *et al.*, 2021). Archaea mikroorganisme metanogenik sangat sensitif terhadap perubahan pH, dan optimal pada 6,8 hingga 7,4. Ketika pH turun, aktivitas mikroorganisme metanogen asetoklastik mulai terhambat, menyebabkan akumulasi asam asetat. Jika pH terus turun, mikroorganisme metanogen hidrogenotrofik juga akan terinhibisi dan pada akhirnya menyebabkan kegagalan proses fermentasi anaerobik (Ban *et al.*, 2013).

SEKOLAH PASCASARJANA