

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori Pengelolaan Lingkungan dan Sumber Daya

Penelitian mengenai optimalisasi pengelolaan limbah industri berbasis *Circular Economy* ini tidak berdiri sendiri secara teknis, melainkan dibangun di atas pilar-pilar teori ekonomi lingkungan dan ekologi industri. Grand teori yang mendasari kerangka berpikir penelitian ini meliputi Prinsip Pencemar Membayar (*Polluter Pays Principle*), paradigma Eko-Efisiensi dan *Zero Waste*, serta pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA).

2.1.1 Prinsip Pencemar Membayar (*Polluter Pays Principle*)

Dalam perspektif ekonomi lingkungan, pembuangan limbah sisa produksi secara langsung ke lingkungan tanpa proses pengolahan akan menciptakan kegagalan pasar (*market failure*). Kegagalan ini muncul dalam bentuk eksternalitas negatif, yaitu biaya sosial dan ekologis (seperti bau menyengat, pencemaran air, dan risiko kesehatan) yang tidak ditanggung oleh produsen, melainkan dibebankan secara sepihak kepada masyarakat sekitar.

Untuk mengatasi distorsi ini, *Organization for Economic Cooperation and Development* (OECD) sejak tahun 1972 telah merumuskan Prinsip Pencemar Membayar atau *Polluter Pays Principle* (PPP). Prinsip ini secara tegas mewajibkan entitas industri yang menimbulkan pencemaran untuk menginternalisasi biaya lingkungan (*internalization of environmental costs*). Artinya, pihak industri harus menanggung seluruh biaya (*cost/tax*) yang diperlukan untuk mencegah, mengendalikan, dan memulihkan kerusakan lingkungan agar kembali pada ambang batas baku mutu yang dapat diterima Lidhatul Umamah (2023).

Dalam konteks industri tahu bakso, prinsip ini menjadi landasan teoretis sekaligus justifikasi mengapa pihak pabrik mutlak harus berinvestasi pada sistem instalasi pengolahan limbah (seperti anaerobic digester) atau memberikan kompensasi riil yang sepadan (*Willingness to Accept*) kepada masyarakat

terdampak, alih-alih mengeksploitasi daya dukung lingkungan secara gratis untuk memaksimalkan marjin keuntungan.

2.1.2 Konsep Eko-Efisiensi dan Paradigma *Zero Waste*

Respons terhadap beban pencemaran industri memunculkan evolusi paradigma pengelolaan lingkungan, yang bergeser dari sekadar pengolahan di ujung pipa (*end-of-pipe treatment*) menuju optimalisasi proses. Eko-efisiensi (*Eco-efficiency*), sebuah konsep yang diperkenalkan oleh *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD), bertumpu pada penciptaan nilai tambah ekonomi barang dan jasa yang lebih tinggi, yang secara simultan dibarengi dengan pengurangan konsumsi sumber daya dan penekanan dampak ekologis secara signifikan.

Puncak dari penerapan eko-efisiensi ini akan bermuara pada paradigma *Zero Waste* (Nir-Limbah). Menurut *Zero Waste International Alliance* (ZWIA), *Zero Waste* adalah pelestarian semua sumber daya melalui produksi, konsumsi, penggunaan kembali dan pemulihan produk, kemasan, serta material secara bertanggung jawab tanpa ada pembakaran dan tanpa ada pembuangan ke tanah, air atau udara yang mengancam lingkungan atau kesehatan manusia.

Zero Waste memandang sistem produksi layaknya metabolisme ekosistem alam, di mana tidak ada istilah "sampah". Melalui kacamata teori ini, limbah organik (ampas tahu dan efluen cair pencucian daging) tidak lagi didefinisikan sebagai residu buangan, melainkan diposisikan sebagai "bahan baku sekunder" (*secondary raw materials*) yang harus ditangkap kembali (*recovery*) untuk diubah menjadi biogas dan pakan ternak. Konsep *Circular Economy* yang disampaikan dalam penelitian ini pada dasarnya adalah instrumen operasional untuk mewujudkan filosofi *Zero Waste* tersebut.

2.1.3 *Life Cycle Assessment* (LCA) dengan Batasan *Gate-to-Gate*

Untuk memastikan bahwa upaya eko-efisiensi dan *Circular Economy* benar-benar menurunkan dampak lingkungan (bukan sekadar memindahkan beban pencemaran ke tempat lain), diperlukan instrumen pengukuran sistematis yang dikenal sebagai *Life Cycle Assessment* (LCA) atau Penilaian Daur Hidup.

Mengacu pada standar ISO 14040/14044, LCA adalah metodologi untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari suatu produk atau layanan di sepanjang siklus hidupnya.

LCA memiliki beberapa tipe batasan sistem (*system boundary*), seperti *Cradle-to-Grave* (dari ekstraksi alam hingga pembuangan akhir) dan *Gate-to-Gate*. Dalam penelitian industri tahu bakso ini, pendekatan yang digunakan secara spesifik adalah batasan *Gate-to-Gate*. Pemilihan batasan ini dilandasi oleh fakta bahwa pabrik tidak melakukan budidaya kedelai atau peternakan daging secara mandiri, melainkan membeli bahan baku setengah jadi.

Oleh karena itu, batasan *Gate-to-Gate* akan memfokuskan evaluasi inventori lingkungan (*Life Cycle Inventory*) secara ketat pada aktivitas internal di dalam batas pagar pabrik saja. Analisis dimulai tepat saat input material (tahu putih, daging, air dan energi LPG/listrik) melewati "gerbang masuk" pabrik, melalui tahapan penggilingan dan pengukusan, hingga bermuara pada "gerbang keluar" pabrik berupa produk jadi (tahu bakso), emisi gas rumah kaca dan timbunan limbah (padat/cair). Melalui batasan yang spesifik ini, analisis jejak emisi dan efisiensi konversi energi menjadi biogas dapat diukur secara akurat tanpa terdistorsi oleh data di luar kendali pabrik.

Dalam mengevaluasi beban lingkungan, *Life Cycle Assessment* (LCA) hadir sebagai instrumen validasi yang holistik. Menurut rumusan yang diaplikasikan oleh Putri, Andarani, dkk. (2022), LCA beroperasi melalui tahapan analisis inventori (*Life Cycle Inventory* / LCI) yang bertugas mendata seluruh parameter aliran *input* (seperti bahan baku, bahan tambahan dan energi) serta aliran *output* (Produk utama, by-product dan limbah). Hasil dari inventori ini kemudian dikuantifikasi dalam Penilaian Dampak (*Impact Assessment*), yang mampu memvisualisasikan berbagai kategori kerusakan, mulai dari potensi asidifikasi hingga penipisan sumber daya abiotik (*abiotic depletion*). Penipisan abiotik ini umumnya dipicu oleh penggunaan energi konvensional secara masif, sehingga LCA sering kali merekomendasikan pencarian dan pemanfaatan energi alternatif.

2.2 Industri Tahu dan Dampak Lingkungannya

Industri tahu merupakan bagian dari subsektor agroindustri berbasis kedelai yang berperan sangat strategis dalam penyediaan pangan bergizi dan menyerap tenaga kerja dari masyarakat sekitarnya. Sehingga di balik kontribusi ekonominya, industri ini juga menghasilkan limbah padat dan cair dalam jumlah yang signifikan, yang berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan apabila tidak dikelola secara tepat (Hardyanti et al., 2023).

Limbah cair hasil proses produksi tahu umumnya memiliki *Chemical Oxygen Demand* (COD) berkisar antara 4.000 – 9.000 mg/L dan *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) antara 3.000 – 5.000 mg/L, hal ini menunjukkan tingginya kandungan bahan organik yang berpotensi mencemari lingkungan perairan (Hartini et al., 2024). Kandungan organik ini berasal dari residu bahan baku seperti protein, lemak dan karbohidrat yang tidak terurai sempurna selama proses perendaman, penggilingan dan perebusan kedelai. Pembuangan limbah cair tanpa pengolahan terlebih dahulu dapat menyebabkan penurunan kualitas air permukaan dan air tanah, serta menimbulkan bau tidak sedap disekitar lokasi industri.

Sementara itu, limbah padat berupa ampas tahu masih memiliki nilai nutrisi yang cukup tinggi, dengan kandungan protein berkisar 23-26 % dan serat kasar mencapai 65%. Kandungan tersebut menunjukkan bahwa ampas tahu memiliki potensi yang dapat di dimanfaatkan sebagai bahan pakan ternak, pupuk organik atau substrat dalam produksi biogas (Bidura et al., 2023). Namun demikian, pada skala industri kecil, potensi pemanfaatan limbah tersebut belum dioptimalkan karena keterbatasan teknologi pengelolaan, minimnya pengetahuan pelaku usaha, serta kurangnya dukungan kelembagaan dalam pengelolaan limbah terpadu.

Akibatnya, tantangan utama yang dihadapi industri ini tidak terbatas pada jumlah limbah yang dihasilkan; tantangan tersebut juga mencakup efisiensi sistem pengelolaan dan sejauh mana limbah digunakan sebagai sumber energi alternatif. Situasi ini menunjukkan perlunya pendekatan inovatif yang dapat mengintegrasikan aspek ekonomi, sosial dan lingkungan ke dalam satu kerangka keberlanjutan.

2.3 Karakteristik Limbah Industri Tahu Bakso

Industri tahu bakso merupakan hasil inovasi dari pengolahan tahu yang memadukan dua proses utama, yaitu pembuatan bakso dan pengolahan tahu menjadi produk tahu bakso. Dalam proses produksinya, industri ini tidak hanya menghasilkan produk yang digemari masyarakat, tetapi juga menimbulkan limbah yang perlu diperhatikan pengelolaannya. Secara umum, limbah yang dihasilkan terbagi menjadi dua jenis, yaitu limbah padat dan limbah cair.

2.3.1 Limbah Padat

Limbah padat industri tahu bakso umumnya berasal dari sisa bahan baku, seperti kedelai yang tidak terolah sempurna, ampas hasil penyaringan, serta residu dari proses penggilingan. Limbah jenis ini dapat menumpuk dan menimbulkan bau tidak sedap apabila tidak segera ditangani. Namun, dengan pengelolaan yang tepat, limbah padat masih berpotensi dimanfaatkan Kembali, misalnya sebagai bahan pakan ternak atau kompos.

2.3.2 Limbah Cair

Limbah cair dihasilkan dari proses penggumpalan (koagulasi) dan perebusan selama pembuatan tahu bakso. Air limbah ini umumnya mengandung sisa protein, lemak dan bahan organik lainnya yang dapat meningkatkan kadar pencemar jika dibuang langsung ke lingkungan. Oleh karena itu, pengolahan limbah cair menjadi penting agar tidak mencemari perairan dan tetap menjaga keseimbangan lingkungan sekitar.

Berdasarkan penelitian (Hardyanti et al., 2023), nilai rasio BOD / COD pada limbah cair tahu berkisar antara (0,5 sampai dengan 0,7), hal ini menunjukkan bahwa limbah cair tahu bersifat biodegradable dan dapat diolah secara biologis dengan sistem anaerob-aerob maupun proses fermentasi. sangat penting untuk membangun sistem pengolahan limbah ramah lingkungan yang sejalan dengan karakteristik industri kecil.

Hartini et al., (2024) menegaskan bahwa nilai COD limbah cair tahu yang mencapai (7.668-9.736 mg/L) menunjukkan perlunya penerapan sistem

pengelolaan limbah terpadu untuk menurunkan beban pencemaran. Pengolahan tersebut tidak hanya berfungsi untuk memenuhi baku mutu air limbah, tetapi juga berpotensi menghasilkan produk sampingan bernilai ekonomi seperti pupuk cair organik dan biogas.

2.4 Konsep *Circular Economy* dalam Pengelolaan Limbah

Konsep *Circular Economy* atau ekonomi sirkular merupakan paradigma pembangunan ekonomi yang berfokus pada upaya meminimalkan timbulan limbah melalui pemanfaatan sumber daya secara efisien dan berkelanjutan (Potting et al., 2017), berbeda dengan sistem ekonomi linear, sistem yang cenderung lebih banyak melakukan proses “produksi-konsumsi-limbah” Dimana *Circular Economy* melakukan perubahan ke dalam sistem tertutup, dimana hal tersebut mempunyai fokus yang lebih pada siklus penggunaan kembali sumber daya, paradigma ini memiliki prinsip yang dikenal sebagai 9R yaitu *refuse, rethink, reduce, reuse, repair, refurbish, remanufacture, repurpose* dan *recycle* bisa ditambahkan prinsip ke 10, yaitu *recover*. Melalui prinsip ini, setiap tahap produksi diupayakan agar tidak menghasilkan limbah sia-sia, melainkan memberi nilai tambah baru bagi lingkungan dan ekonomi.

2.4.1 *Recycle* dan *recover*

Dalam industri tahu, konsep dari *recycle* dan *recover* dapat diimplementasikan dengan cara menggunakan limbah cair dalam proses produksi untuk mendapatkan energi alternatif berupa biogas dan juga pupuk organik cair melalui proses anaerobic fermentation. Hal ini bukan hanya sebagai cara untuk menjaga lingkungan agar tetap bersih, namun juga memiliki manfaat dari segi ekonomis bagi para pelaku usaha dengan cara menjadikan limbah energi dan pupuk.

2.4.2 *Reuse* dan *repurpose*

Prinsip dari *reuse* dan *repurpose* dapat diterapkan pada limbah padat, seperti ampas tahu, yang masih mengandung nilai gizi cukup tinggi. Limbah ini dapat diolah kembali menjadi produk pangan alternatif, misalnya (tempe gembus, abon tahu atau tepung protein nabati). Dengan demikian, limbah padat tidak

hanya berkurang, tetapi juga mampu menciptakan peluang usaha baru dan meningkatkan nilai ekonomi produk samping industri tahu.

2.4.3 *Reduce dan rethink*

Penerapan prinsip *reduce* dan *rethink* berfokus pada peningkatan efisiensi penggunaan sumber daya selama proses produksi, seperti air, energi dan bahan baku. Dengan menerapkan inovasi teknologi dan manajemen produksi yang lebih bijak, industri tahu dapat menekan jumlah limbah yang dihasilkan, sekaligus meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan usahanya.

Sebagaimana dikemukakan oleh Afiv M., (2025), implementasi konsep *Circular Economy* dibidang industri akan menghasilkan sistem produksi yang semakin sirkular serta mampu menekan sisa limbah dan mendongkrak efisiensi sumber daya. Hal ini tentunya juga akan memicu penciptaan nilai ekonomi baru dengan cara mengembangkan produk turunan dari industri tersebut dengan potensi pasar yang besar, yang pada akhirnya akan meningkatkan permintaan di industri kecil berbasis lingkungan, jadi implementasi konsep *Circular Economy* tidak hanya menjadi Solusi teknis dalam manajemen limbah, melainkan strategi transformasional yang bisa memicu perubahan sistemik yang nantinya akan berujung pada produksi berkelanjutan dan konsumsi bertanggung jawab. Tidak hanya menjadi Solusi teknis dalam manajemen limbah, *Circular Economy* juga akan menjadi strategi strategi tranformasional yang memicu perubahan sistemik yang yang pada akhirnya akan berujung pada produksi berkelanjutan.

2.5 Perspektif Ilmu Lingkungan terhadap Pengelolaan Limbah

Dari perspektif ilmu lingkungan, pengelolaan limbah industri pangan, termasuk industri tahu bakso, tidak dapat dipisahkan dari prinsip pembangunan berkelanjutan (*sustainable development*) yang menyeimbangkan tiga dimensi utama kerangka *Triple Bottom Line*, yaitu ekologis, ekonomi dan sosial. Pendekatan terintegrasi ini sejalan dengan kerangka Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (*Sustainable Development Goals / SDGs*). Secara ekologis, pengelolaan ini berkontribusi langsung pada SDG 6 (*Clean Water and Sanitation*) melalui perlindungan perairan permukiman dari eutrofikasi akibat limbah cair,

serta SDG 12 (*Responsible Consumption and Production*) yang menekankan efisiensi sumber daya dan paradigma *zero waste* dalam siklus produksi. Dari dimensi ekonomi, implementasi *Circular Economy* mempromosikan SDG 8 (*Decent Work and Economic Growth*), di mana industri skala mikro mampu menciptakan nilai tambah finansial (efisiensi operasional dan produk turunan limbah) sekaligus mempertahankan lapangan kerja bagi masyarakat lokal tanpa harus mengorbankan kualitas lingkungan hidup di sekitarnya. Pada akhirnya, keberhasilan integrasi pilar ekologi dan ekonomi tersebut sangat bergantung pada dimensi sosial dan kelembagaan, yang merupakan perwujudan nyata dari SDG 17 (*Partnerships for the Goals*). Transisi menuju sistem sirkular yang berkelanjutan ini tidak dapat berjalan sendiri, melainkan mensyaratkan adanya kemitraan strategis yang kuat antara entitas industri (pemilik pabrik), masyarakat lokal (melalui BUMDes dan kelompok warga), serta otoritas Pemerintah Daerah Kota Semarang.

2.5.1 Pendekatan Ekologi dan Efisiensi Sumber Daya

Secara ekologis, limbah industri tahu bakso berpotensi menurunkan kualitas air, menimbulkan bau tidak sedap dan menyebabkan eutrofikasi akibat tingginya kandungan bahan organik. Penelitian oleh Hardyanti et al., (2023) menunjukkan bahwa karakteristik limbah cair tahu sangat dipegaruhi oleh jenis kedelai dan tahapan produksi, di mana tingginya kandungan BOD dan COD dapat mencemari lingkungan perairan, jika tidak diolah dengan benar. Selain itu, Hartini et al., (2024) melalui pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) menegaskan bahwa proses produksi tahu berkontribusi terhadap emisi karbon dan pencemaran air, namun dampak tersebut dapat dikurangi melalui strategi daur ulang dan pemanfaatan limbah.

Dari sisi efisiensi sumber daya, penerapan konsep *green industry* menjadi langkah penting dalam mengoptimalkan penggunaan air, energi dan bahan baku. Martina Colimoro et al., (2023) menegaskan bahwa penggunaan energi terbarukan dan efisiensi sumber daya dalam proses produksi tahu dapat menurunkan jejak ekologis sekaligus meningkatkan keberlanjutan rantai produksi pangan. Dengan

demikian, efisiensi bukan hanya soal penghematan biaya, tetapi juga bentuk tanggung jawab ekologis terhadap keberlanjutan sumber daya alam.

2.5.2 Teknologi, Sosial dan Ekonomi Sirkular (*Circular Economy*)

Dari perspektif teknologi, inovasi berperan besar dalam pengelolaan limbah industri tahu bakso. Teknologi tepat guna seperti sistem pengolahan anaerobik, biofilter, serta fermentasi dapat dimanfaatkan untuk mengurangi beban pencemaran. Studi oleh Bidura et al., (2023) membuktikan bahwa limbah padat tahu dapat diolah menjadi pakan ternak bernilai tinggi dengan penambahan wortel dan probiotik, yang meningkatkan kandungan gizi dan β -karoten. Pendekatan ini menunjukkan potensi penerapan konsep *zero waste*, di mana limbah tidak lagi dipandang sebagai masalah, tetapi sebagai sumber daya baru yang dapat dimanfaatkan kembali.

Selain aspek teknis, pengelolaan limbah juga menuntut pemberdayaan sosial dan kelembagaan. Partisipasi masyarakat serta kolaborasi antara pemerintah, pelaku industri dan akademisi menjadi kunci dalam mewujudkan sistem produksi yang berkelanjutan. Afiv M., (2023) menyebut bahwa penerapan *Circular Economy* di industri tahu di Indonesia mampu meningkatkan efisiensi material dan energi, sekaligus membuka peluang ekonomi baru dari limbah. Pandangan ini sejalan dengan kerangka yang dikemukakan oleh Potting et al., (2017) yang menekankan pentingnya inovasi rantai produk dalam transisi menuju ekonomi sirkular. Di tingkat global, Ghimire et al., (2021) juga menyoroti bahwa sistem pengolahan limbah cair yang berorientasi pada *Circular Economy* tidak hanya mengurangi dampak lingkungan, tetapi juga meningkatkan efisiensi energi dan nilai ekonomi dari limbah.

Dengan pendekatan tersebut, pengelolaan limbah tahu bakso tidak hanya berfokus pada aspek teknis pengolahan limbah, tetapi juga mencakup dimensi sosial, ekonomi dan kebijakan lingkungan. Pendekatan terpadu ini mendukung terciptanya industri pangan yang berdaya saing sekaligus ramah lingkungan, sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular dan pembangunan berkelanjutan.

2.6 Kerangka Konseptual Penelitian

Penelitian ini berfokus pada hubungan kausalitas antara karakteristik limbah cair dan padat tahu bakso dengan valuasi ekonomi eksternalitasnya, yang kemudian diintervensi menggunakan desain *Circular Economy*. Kebaruan (*novelty*) dari kerangka konseptual ini terletak pada integrasi antara analisis teknis lingkungan (*Life Cycle Assessment* dengan batasan *Gate-to-Gate*) dan analisis ekonomi lingkungan (*Contingent Valuation Method* / CVM). Integrasi ini tidak hanya memetakan potensi fisik dan jejak emisi limbah, tetapi juga memvalidasi urgensi transisi sirkular berdasarkan nilai kerugian moneter riil yang ditanggung oleh masyarakat. Melalui pendekatan ini, perancangan *Circular Economy* divalidasi secara saintifik sebagai solusi ganda: menyelesaikan kegagalan pasar (*market failure*) akibat pencemaran, sekaligus menciptakan nilai tambah sumber daya bagi UMKM.

Tabel. 2.1. Design Penelitian

Tujuan Penelitian	Metode Analisis	Material & Sumber Data	Referensi Utama
Tujuan 1: Menganalisis karakteristik limbah padat dan cair hasil proses produksi tahu bakso.	1. Uji Laboratorium (Kuantitatif):Pengujian fisik-kimia mengacu pada standar SNI. 2. Analisis Komparatif: Membandingkan nilai konsentrasi polutan dengan regulasi Baku Mutu Lingkungan.	1. Sampel Limbah Cair (In-situ & Eks-situ):Diambil dari hulu, outlet, dan hilir untuk uji BOD, COD, TSS, dan pH. 2. Sampel Limbah Padat:Ampas tahu untuk Uji Proksimat (Protein, Serat Kasar, Kadar Air).	1. PP No. 22 Tahun 2021 (Baku Mutu Perairan) 2. Hardyanti et al. (2023)
Tujuan 2: Mengidentifikasi potensi penerapan konsep Circular Economy dalam pengelolaan limbah tahu bakso.	1. Life Cycle Assessment (LCA): Penilaian batas Gate-to-Gate (ISO 14040/14044) menggunakan perhitungan Life Cycle Inventory (LCI). 2. Contingent Valuation Method (CVM): Valuasi ekonomi kerugian warga. 3. Kalkulasi Stoikiometri & Komparatif: Estimasi potensi energi (biogas) dan pakan ternak.	1. Data Inventori Produksi: Volume input bahan baku (kedelai, air, energi) dan output (limbah, produk). 2. Data Primer CVM: Hasil kuesioner <i>Willingness to Accept</i> (WTA) dari 103 KK terdampak. 3. Data Karakteristik Limbah: Rasio BOD/COD (Uji Laboratorium).	1. Hartini et al. (2024) 2. Afiv M. (2025) 3. Standar Nasional Indonesia (SNI) 3148:2018 (Pakan)
Tujuan 3: Menyusun strategi optimalisasi pengelolaan limbah tahu bakso berbasis Circular Economy.	1. Analisis Kualitatif Tematik: Menggunakan perangkat lunak (NVivo/Atlas.ti) untuk koding wawancara mendalam. 2. Cost-Benefit Analysis (CBA): Analisis nilai tambah finansial dari skenario sirkular. 3. Kerangka Triple Bottom Line (TBL): Evaluasi keberlanjutan pada 3 pilar utama (Ekonomi, Sosial & Lingkungan).	1. Transkrip Wawancara Mendalam:Dengan pemrakarsa pabrik, Perangkat Desa/BUMDes, warga (PKK/Dasawisma), dan DLH Semarang. 2. Data Struktur Biaya: Pengeluaran energi operasional (LPG) dan biaya kompensasi pabrik.	1. Potting et al. (2017) - Prinsip 9R Circular Economy 2. Bidura et al. (2023) 3. John Elkington (1997) - Triple Bottom Line

2.6.1 Design penelitian:

Alur berpikir penelitian ini disusun berdasarkan pendekatan ilmu lingkungan dan konsep ekonomi sirkular (*Circular Economy*) yang berlandaskan prinsip pembangunan berkelanjutan (*sustainable development*). Tujuannya adalah untuk mengembangkan sistem pengelolaan limbah tahu bakso yang tidak hanya efektif secara teknis, tetapi juga memberikan manfaat ekonomi dan sosial bagi Masyarakat, Tahapan berpikir penelitian meliputi:

1. Identifikasi karakteristik limbah padat dan cair

Tahap ini mencakup analisis parameter kualitas lingkungan seperti *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Total Suspended Solid* (TSS), pH dan *Dissolved Oxygen* (DO) melalui pengujian laboratorium. Selain pengujian fisik, tahap ini juga mengidentifikasi nilai kerugian ekonomi masyarakat akibat dampak ekologis limbah menggunakan pendekatan *Contingent Valuation Method* (CVM) serta memetakannya dalam inventori awal *Life Cycle Assessment* (LCA). Analisis ini bertujuan mengetahui tingkat pencemaran dan potensi dampak ekologis limbah yang dihasilkan oleh proses produksi tahu bakso. Studi oleh Hardyanti et al., (2023) menunjukkan bahwa karakteristik limbah cair tahu sangat bergantung pada jenis kedelai dan tahapan proses, dengan nilai BOD dan COD yang tinggi sehingga berpotensi mencemari perairan apabila tidak diolah dengan baik.

2. Analisis potensi pemanfaatan limbah menjadi produk bernilai tambah

Limbah tahu, baik padat maupun cair, berpotensi diolah menjadi pupuk organik, biogas, atau pakan ternak. Analisis potensi ini dilakukan secara kuantitatif melalui perhitungan stoikiometri penyusutan nilai COD untuk mengestimasi volume produksi gas metana (biogas). Sementara itu, untuk potensi pakan ternak dan pupuk kompos, dilakukan komparasi antara hasil uji proksimat (kadar protein, kadar air, dan serat) ampas tahu dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) terkait serta evaluasi rasio C/N. Hasil penelitian Bidura et al., (2023), menunjukkan bahwa campuran limbah tahu dengan wortel dan probiotik mampu meningkatkan kualitas pakan ternak, menambah kandungan β -karoten dan nilai gizi. Pendekatan ini mencerminkan prinsip 3R (*Reduce*, *Reuse* dan *Recycle*) yang menjadi bagian awal dari ekonomi sirkular.

3. Perancangan model *Circular Economy* berbasis prinsip 9R

Model ini mengacu pada prinsip *Refuse*, *Rethink*, *Reduce*, *Reuse*, *Repair*, *Refurbish*, *Remanufacture*, *Repurpose*, dan *Recycle*, disesuaikan dengan kondisi industri tahu bakso skala kecil. Perancangan model

dilakukan dengan menyusun neraca massa (*mass balance*) aliran material tertutup (*closed-loop*), yang secara teknis mengintegrasikan jalur pemulihan energi melalui rancangan reaktor *anaerobic digester* komunal untuk menampung limbah cair, dan jalur pemulihan material untuk mengalihfungsikan (*repurpose*) ampas tahu secara langsung menjadi pakan atau pupuk. Menurut Afiv M., (2025), penerapan konsep *Circular Economy* di sektor industri kecil dapat meningkatkan efisiensi sumber daya dan menurunkan beban limbah. Pandangan ini juga sejalan dengan kerangka inovasi rantai produk yang dikembangkan oleh Potting et al., (2017).

4. Evaluasi dampak ekonomi, sosial, dan lingkungan

Tahap ini menilai sejauh mana penerapan model sirkular mampu meningkatkan nilai ekonomi (melalui efisiensi biaya dan produk samping bernilai tambah), dampak sosial (melalui pemberdayaan masyarakat) dan dampak lingkungan (melalui pengurangan emisi dan pencemaran). Evaluasi dampak lingkungan diukur secara kuantitatif menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) batasan *Gate-to-Gate* untuk menghitung proyeksi penurunan jejak emisi dan efisiensi energi. Dampak ekonomi dievaluasi menggunakan *Cost-Benefit Analysis* guna membandingkan biaya investasi teknologi dengan penciptaan nilai tambah (*added value*) serta penghapusan defisit kompensasi warga. Sedangkan dampak sosial Evaluasi dampak ekonomi dilakukan melalui Valuasi Ekonomi dengan metode *Contingent Valuation Method* (CVM) untuk mengukur pemulihan nilai kesejahteraan masyarakat (berdasarkan nilai *Willingness to Accept*) serta analisis biaya-manfaat (*Cost-Benefit Analysis*) untuk melihat efisiensi finansial bagi industri dan dievaluasi berdasarkan potensi penyelesaian konflik lingkungan dan peluang pemberdayaan warga lokal. Pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) sebagaimana dilakukan oleh Hartini et al., (2024) dapat digunakan untuk mengukur efisiensi energi dan jejak karbon dalam siklus hidup produksi tahu.

5. Perumusan strategi implementasi berkelanjutan

Strategi ini berfokus pada penerapan hasil penelitian di tingkat lokal melalui kolaborasi antar stakeholder seperti pemerintah daerah, pelaku industri dan masyarakat. Strategi ini diformulasikan dengan merancang rekayasa kelembagaan, yaitu mendorong keterlibatan Badan Usaha Milik Desa (BUMDes) sebagai entitas pengelola instalasi pengolahan limbah (IPAL) komunal, serta memberdayakan kelompok masyarakat (seperti forum Dasawisma/PKK) untuk menyerap dan mendistribusikan produk turunan sirkular tersebut. Menurut Ghimire et al., (2021), transisi menuju sistem pengelolaan limbah berbasis Circular Economy memerlukan sinergi kelembagaan dan kebijakan yang mendorong efisiensi energi dan pengelolaan sumber daya berkelanjutan.