

EVALUASI KINERJA LINGKUNGAN DAN POTENSI VALORISASI HASIL SAMPING AGROINDUSTRI SIRUP KALAMANSI DI PROVINSI BENGKULU

Environmental Performance Assessment and Valorization Potential of By-products from the Kalamansi Syrup Agroindustry in Bengkulu Province

Iman Darmatama^{1*}, Fahrul Rozi Maulana², Zakhi Restu Pratama³

^{1,3} Program Studi Pengelolaan Sumber Daya Alam, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu, Bengkulu, Indonesia

² Program Studi Sains Agribisnis, Fakultas Ekonomi dan Manajemen, Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia

* E-mail Korespondensi: idarmatama@gmail.com

ABSTRACT

Calamansi (Citrofortunella microcarpa) is an agricultural commodity developed and processed into value-added products in Bengkulu Province, including calamansi syrup. This study aimed to evaluate the environmental performance of the calamansi syrup agroindustry and identify the valorization potential of its by-products based on secondary scientific data. A descriptive-quantitative approach was applied by synthesizing published studies on production processes, life cycle assessment (LCA), by-product characteristics, and valorization technologies. Environmental performance was evaluated using secondary LCA results with a cradle-to-grave system boundary, a functional unit of 500 mL of calamansi syrup per bottle, and the CML-IA Baseline method. The results showed that the production stage was the main hotspot, particularly due to sugar use. The reported impact values were 4.98483×10^{-14} kg CO₂-eq/FU for Global Warming Potential, 3.04384×10^{-14} kg SO₂-eq/FU for Acidification Potential, 5.43431×10^{-14} kg PO₄-eq/FU for Eutrophication Potential, and 1.40336×10^{-15} kg CFC-11-eq/FU for Ozone Layer Depletion Potential. The by-products comprised peel, pulp, seeds, and settling liquid. Peel showed the strongest empirical basis for valorization through pectin extraction, while the combined use of peel and pulp showed strong potential for concrete (aromatic solvent extract) production. The settling liquid also showed potential for essential-oil production. The findings indicate that by-product valorization can support resource efficiency and sustainability, although comparative LCA and economic feasibility of each valorization scenario require further study.

Key words: Bengkulu, by-products, calamansi syrup, environmental performance, life cycle assessment, valorization.

ABSTRAK

Jeruk kalamansi (*Citrofortunella microcarpa*) merupakan komoditas pertanian yang dikembangkan dan diolah menjadi produk bernilai tambah di Provinsi Bengkulu, salah satunya sirup kalamansi. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja lingkungan agroindustri sirup kalamansi serta mengidentifikasi potensi valorisasi hasil samping berdasarkan data sekunder dari publikasi ilmiah. Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif-kuantitatif dengan mensintesis informasi mengenai proses produksi, hasil *Life Cycle Assessment* (LCA), karakteristik hasil samping, dan teknologi pemanfaatannya. Evaluasi kinerja lingkungan mengacu pada hasil LCA sekunder dengan batas sistem *cradle-to-grave*, unit fungsional 500 mL sirup kalamansi per botol, dan metode CML-IA Baseline. Hasil menunjukkan bahwa tahap produksi merupakan hotspot utama, terutama akibat penggunaan gula. Nilai dampak yang dilaporkan meliputi *Global Warming Potential* sebesar $4,98483 \times 10^{-14}$ kg CO₂-eq/FU, *Acidification Potential* sebesar $3,04384 \times 10^{-14}$ kg SO₂-eq/FU, *Eutrophication Potential* sebesar $5,43431 \times 10^{-14}$ kg PO₄-eq/FU, dan *Ozone Layer Depletion Potential* sebesar $1,40336 \times 10^{-15}$ kg CFC-11-eq/FU.

Hasil samping terdiri atas kulit, pulp, biji, dan cairan hasil pengendapan. Kulit memiliki dasar empiris paling kuat untuk divalorisasi melalui ekstraksi pektin, sedangkan kombinasi kulit dan pulp menunjukkan potensi kuat untuk produksi *concrete* (*ekstrak aromatik hasil ekstraksi pelarut*). Cairan hasil pengendapan juga menunjukkan potensi untuk dimanfaatkan dalam produksi minyak atsiri. Temuan menunjukkan bahwa valorisasi hasil samping berpotensi mendukung efisiensi sumber daya dan keberlanjutan agroindustri, meskipun LCA komparatif dan analisis kelayakan ekonomi setiap skenario masih diperlukan.

Kata kunci: Bengkulu, hasil samping, kinerja lingkungan, *life cycle assessment*, sirup kalamansi, valorisasi.

PENDAHULUAN

Jeruk kalamansi (*Citrofortunella microcarpa*) merupakan salah satu komoditas hortikultura yang berkembang dan dimanfaatkan sebagai bahan baku berbagai produk olahan di Provinsi Bengkulu. Karakteristik buah yang memiliki cita rasa asam dan aroma khas mendorong pemanfaatannya dalam bentuk produk bernilai tambah, salah satunya sirup kalamansi. Hidayat et al. (2018) menunjukkan bahwa ketersediaan bahan baku jeruk kalamansi di Kota Bengkulu telah mendorong berkembangnya industri rumah tangga pengolahan sirup. Perkembangan tersebut menunjukkan bahwa pengolahan kalamansi tidak hanya berperan dalam meningkatkan nilai ekonomi komoditas, tetapi juga menjadi bagian dari aktivitas agroindustri berbasis sumber daya pertanian lokal. Dari sisi mutu bahan baku, Dinata dan Hidayat (2019) juga menunjukkan bahwa kondisi buah kalamansi berpengaruh terhadap karakteristik fisik dan kimia buah, termasuk bobot, diameter, volume sari, dan total padatan terlarut.

Pengolahan jeruk kalamansi menjadi sirup menghasilkan produk utama sekaligus sejumlah hasil samping. Pada proses pengepresan dan pengolahan, bagian buah yang tidak masuk ke dalam produk utama dapat berupa kulit, pulp, biji, serta cairan hasil pengendapan. Tutuarima et al. (2018) secara khusus melaporkan bahwa industri sirup jeruk kalamansi menghasilkan kulit, pulp, biji, dan cairan hasil pengendapan sebagai hasil samping. Keberadaan material tersebut menunjukkan bahwa peningkatan produksi sirup juga perlu diikuti dengan pengelolaan hasil samping yang tepat agar tidak hanya berorientasi pada peningkatan output produk. Dari perspektif agroindustri berkelanjutan, hasil samping perlu dipandang sebagai material yang masih memiliki potensi guna dan bukan semata-mata sebagai limbah yang harus dibuang.

Potensi pemanfaatan hasil samping kalamansi telah dibuktikan melalui berbagai penelitian. Rosalina et al. (2017) menunjukkan bahwa limbah kulit dan kulit+daging buah hasil pengepresan jeruk kalamansi dapat digunakan sebagai sumber pektin. Rendemen pektin dari kulit kalamansi dilaporkan mencapai 15,3%, sedangkan dari kulit+daging buah sebesar 7,82%, dengan kandungan galakturonat pada pektin kulit kalamansi mencapai 93,51%. Sementara itu, Tutuarima et al. (2018) mengkaji pemanfaatan kulit dan pulp hasil samping industri sirup sebagai bahan untuk menghasilkan *concrete* (*ekstrak aromatik hasil ekstraksi pelarut*) melalui proses maserasi. Penelitian tersebut memperoleh rendemen *concrete* maksimum sebesar 54,6823% pada kondisi penelitian tertentu. Temuan tersebut memperlihatkan bahwa hasil samping agroindustri kalamansi mempunyai kandungan dan karakteristik yang memungkinkan dikembangkan menjadi bahan atau produk bernilai tambah.

Di sisi lain, pemanfaatan hasil samping perlu ditempatkan dalam konteks kinerja lingkungan agroindustri secara keseluruhan. Setiap proses pengolahan membutuhkan bahan baku, air, energi, bahan kemasan, dan sumber daya lainnya serta menghasilkan keluaran berupa produk, hasil samping, dan limbah. Fahlin et al. (2025) melalui kajian *Life Cycle Assessment* pada produk sirup kalamansi Bengkulu menunjukkan bahwa aktivitas agroindustri menghasilkan penggunaan sumber daya dan energi serta keluaran berupa limbah padat dan cair. Penelitian tersebut mengevaluasi dampak lingkungan sepanjang daur hidup produk, mulai dari tahap hulu hingga hilir, dan mengidentifikasi skenario perbaikan untuk mengurangi dampak lingkungan. Temuan tersebut memperkuat kebutuhan untuk melihat pengelolaan

hasil samping tidak hanya dari sisi potensi ekonomi, tetapi juga dari kontribusinya terhadap peningkatan kinerja lingkungan dan keberlanjutan agroindustri.

Berdasarkan penelitian terdahulu, informasi mengenai proses produksi sirup kalamansi, karakteristik hasil samping, serta alternatif pemanfaatannya telah tersedia secara terpisah, tetapi informasi tersebut perlu disintesis untuk memberikan gambaran yang lebih terarah mengenai hubungan antara kinerja lingkungan dan potensi valorisasi hasil samping agroindustri. Penelitian ini menggunakan data sekunder yang berasal dari publikasi ilmiah dan sumber penelitian yang dapat diverifikasi untuk mengevaluasi kinerja lingkungan agroindustri sirup kalamansi serta mengidentifikasi dan menilai potensi valorisasi hasil samping yang dapat mendukung keberlanjutan agroindustri di Provinsi Bengkulu. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan pemanfaatan hasil samping yang lebih produktif sekaligus mendukung pengelolaan lingkungan pada agroindustri berbasis komoditas lokal.

METODE PENELITIAN

Pendekatan Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif-kuantitatif dan komparatif berbasis data sekunder. Data diperoleh dari publikasi ilmiah yang membahas agroindustri sirup kalamansi, proses pengolahan, penggunaan sumber daya, dampak lingkungan, serta pemanfaatan hasil samping. Data utama mengenai kinerja lingkungan mengacu pada hasil penelitian LCA sirup kalamansi Bengkulu yang dilakukan oleh Fahlin et al. (2025), sedangkan informasi mengenai karakteristik dan pemanfaatan hasil samping diperoleh dari penelitian Tutuarima et al. (2018). Penelitian Tutuarima et al. (2018) mengidentifikasi hasil samping industri sirup kalamansi berupa kulit, pulp, biji, dan cairan hasil pengendapan serta mengkaji pemanfaatan kulit dan pulp untuk menghasilkan *concrete*. Dengan demikian, penelitian ini merupakan kajian sintesis data sekunder dan bukan LCA primer masing-masing kombinasi perlakuan diulang sebanyak 3 kali sehingga terdapat 36 unit percobaan.

Data sekunder dipilih berdasarkan tiga kriteria, yaitu (1) berasal dari sumber yang dapat diverifikasi, (2) memiliki informasi kuantitatif atau deskripsi proses yang jelas, dan (3) relevan dengan sistem agroindustri sirup kalamansi di Provinsi Bengkulu. Data dari sumber yang berbeda tidak langsung digabungkan. Setiap data terlebih dahulu diperiksa berdasarkan lokasi penelitian, tahun pengamatan, unit pengukuran, batas sistem, dan karakteristik proses.

Sumber dan Jenis Data

Data penelitian dikelompokkan menjadi tiga bagian, yaitu data proses agroindustri, data kinerja lingkungan, serta data hasil samping dan alternatif valorisasi. Data proses agroindustri meliputi bahan baku, tahapan pengolahan, penggunaan air, energi, bahan tambahan, bahan kemasan, produk utama, dan hasil samping. Data kinerja lingkungan diperoleh dari penelitian *Life Cycle Assessment* (LCA) yang telah dipublikasikan, terutama penelitian Fahlin et al. (2025) mengenai sirup kalamansi Bengkulu. Penelitian tersebut menggunakan batas sistem *cradle-to-grave* dengan unit fungsional 500 mL sirup kalamansi per botol dan mengevaluasi *Global Warming Potential* (GWP), *Acidification Potential* (AP), *Eutrophication Potential* (EP), dan *Ozone Layer Depletion Potential* (ODP). Data hasil samping dan alternatif valorisasi mencakup jenis hasil samping, jumlah atau proporsinya, bentuk pemanfaatan, proses pengolahan, rendemen, dan karakteristik produk yang dihasilkan. Tutuarima et al. (2018) melaporkan bahwa pengolahan sirup kalamansi menghasilkan hasil samping berupa kulit, pulp, biji, dan cairan hasil pengendapan, sedangkan kulit dan pulp telah dikaji untuk menghasilkan *concrete*.

Evaluasi Kinerja Lingkungan

Evaluasi kinerja lingkungan dilakukan menggunakan kerangka *Life Cycle Assessment* (LCA) yang terdiri atas *goal and scope definition*, *life cycle inventory* (LCI), *life cycle impact assessment* (LCIA), dan interpretasi. Penelitian ini tidak melakukan LCA primer melalui pengumpulan data langsung dari unit agroindustri, tetapi menggunakan data LCA yang telah dipublikasikan sebagai basis

evaluasi dan kemudian menghubungkannya dengan analisis hasil samping serta potensi valorisasi. Batas sistem mengikuti dataset yang memiliki informasi paling lengkap dan dapat dipertanggungjawabkan. Penelitian Fahlin et al. (2025) menggunakan pendekatan *cradle-to-grave*, sehingga mencakup tahapan penyediaan bahan baku, proses produksi, distribusi, penggunaan produk, dan pengelolaan akhir produk. Pendekatan tersebut digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi posisi agroindustri sirup kalamansi dalam menghasilkan potensi dampak lingkungan.

Inventarisasi Daur Hidup

Inventarisasi daur hidup dilakukan dengan menyusun seluruh input dan output yang berkaitan dengan produksi sirup kalamansi berdasarkan data sekunder yang tersedia. Input meliputi buah kalamansi, gula, air, energi listrik, bahan bakar, bahan kemasan, dan bahan pendukung lainnya, sedangkan output meliputi sirup kalamansi sebagai produk utama serta kulit, pulp, biji, cairan hasil pengendapan, limbah cair, limbah padat, dan emisi yang dilaporkan dalam sumber data. Setiap data dicatat berdasarkan satuan aslinya, kemudian dikonversi apabila diperlukan agar dapat digunakan dalam satuan yang seragam. Data yang tidak memiliki informasi mengenai satuan, batas sistem, atau dasar perhitungan yang memadai tidak digunakan untuk perhitungan kuantitatif. Inventarisasi ini digunakan untuk mengidentifikasi hubungan antara penggunaan input, produksi produk utama, pembentukan hasil samping, dan keluaran lingkungan.

Penilaian Dampak Lingkungan

Penilaian dampak lingkungan dilakukan berdasarkan hasil *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) yang tersedia pada sumber utama. Kategori dampak yang digunakan meliputi GWP dalam satuan kg CO₂-eq, AP dalam kg SO₂-eq, EP dalam kg PO₄-eq, dan ODP dalam kg CFC-11-eq. Metode CML-IA Baseline dipertahankan sebagai metode penilaian dampak karena digunakan oleh Fahlin et al. (2025) dalam penelitian LCA sirup kalamansi Bengkulu. Nilai dampak kemudian dibandingkan berdasarkan unit fungsional yang digunakan pada sumber data. Apabila data memungkinkan dilakukan konversi secara konsisten, nilai dampak dinyatakan per unit produk sehingga dapat digunakan untuk mengidentifikasi kategori dampak dan tahapan proses yang memberikan kontribusi relatif lebih besar terhadap kinerja lingkungan.

Identifikasi dan Kuantifikasi Hasil Samping

Identifikasi hasil samping dilakukan berdasarkan aliran material yang tidak menjadi bagian dari produk sirup utama. Hasil samping dikelompokkan menjadi kulit, pulp, biji, dan cairan hasil pengendapan sesuai dengan informasi yang dilaporkan Tutuarima et al. (2018). Apabila data massa tersedia, proporsi masing-masing hasil samping dihitung terhadap massa bahan baku atau dasar perhitungan yang digunakan dalam sumber data dengan persamaan:

$$Y_i = \frac{M_i}{M_b} \times 100\%$$

Keterangan:

Y_i = proporsi hasil samping ke-i (%); M_i = massa hasil samping ke-i (kg);

M_b = massa bahan baku yang digunakan (kg).

Perhitungan hanya dilakukan terhadap data yang memiliki dasar pengukuran yang jelas. Data kualitatif tetap digunakan untuk mendukung identifikasi dan pembahasan, tetapi tidak dikonversi menjadi nilai kuantitatif tanpa dasar empiris.

Analisis Potensi Valorisasi Hasil Samping

Potensi valorisasi dianalisis dengan mengidentifikasi berbagai bentuk pemanfaatan hasil samping yang telah dibuktikan melalui penelitian terdahulu. Analisis mencakup jenis hasil samping, alternatif pemanfaatan, produk yang dihasilkan, proses pengolahan, rendemen, karakteristik bahan atau produk, serta kebutuhan teknologi. Alternatif valorisasi tidak ditentukan berdasarkan asumsi, tetapi harus memiliki dukungan dari publikasi ilmiah atau sumber penelitian yang dapat diverifikasi. Kulit dan pulp, misalnya, telah diteliti oleh Tutuarima et al. (2018) sebagai bahan baku pembuatan *concrete*. Informasi tersebut digunakan untuk menilai sejauh mana hasil samping agroindustri sirup kalamansi dapat dialihkan dari material yang tidak termanfaatkan menjadi bahan baku atau produk yang memiliki nilai guna lebih tinggi.

Penilaian Potensi Valorisasi

Potensi valorisasi dianalisis secara kualitatif-komparatif berdasarkan empat aspek, yaitu (1) kekuatan bukti empiris pemanfaatan, (2) potensi pemanfaatan atau pengalihan hasil samping dari aliran residu, (3) potensi nilai tambah, dan (4) kesiapan atau kesederhanaan teknologi. Penilaian didasarkan pada informasi yang tersedia dalam literatur, terutama keberadaan hasil eksperimen, rendemen atau hasil produk, karakteristik bahan, serta metode pengolahan yang telah diuji. Alternatif dengan bukti empiris lebih kuat dan jalur pemanfaatan yang lebih jelas ditempatkan pada tingkat potensi yang lebih tinggi. Kategori sangat tinggi diberikan pada alternatif yang memiliki bukti eksperimen langsung, informasi rendemen atau karakteristik produk yang jelas, serta jalur pemanfaatan yang telah diuji pada hasil samping kalamansi. Kategori tinggi diberikan pada alternatif yang memiliki bukti empiris pemanfaatan, tetapi informasi mengenai karakteristik produk, kondisi proses, atau penerapannya masih lebih terbatas. Karena penelitian tidak melibatkan survei pakar, data biaya, atau pengujian teknologi pada kondisi agroindustri aktual, penelitian ini tidak memberikan skor numerik yang bersifat subjektif. Hasil penilaian digunakan untuk mengelompokkan alternatif berdasarkan kekuatan bukti dan prospek penerapannya, bukan sebagai pengukuran kuantitatif kelayakan ekonomi atau lingkungan.

Analisis Potensi Kontribusi Valorisasi terhadap Kinerja Lingkungan

Kontribusi valorisasi terhadap kinerja lingkungan dievaluasi dengan membandingkan kondisi dasar dan skenario pemanfaatan hasil samping apabila data lingkungan untuk kedua kondisi tersedia. Persentase perubahan dampak dihitung menggunakan persamaan:

$$R = \frac{D_b - D_v}{D_b} \times 100\%$$

Keterangan:

R = persentase perubahan dampak (%);

D_b = dampak pada kondisi dasar;

D_v = dampak pada skenario valorisasi.

Nilai positif menunjukkan adanya penurunan dampak pada skenario valorisasi. Apabila data kuantitatif untuk membangun skenario tidak tersedia, hasil penelitian tidak akan membuat estimasi baru, tetapi menyajikan potensi manfaat lingkungan berdasarkan bukti empiris dari penelitian terdahulu. Dalam penelitian ini, data yang tersedia belum memungkinkan penyusunan inventori LCA baru untuk setiap skenario valorisasi. Oleh karena itu, kontribusi lingkungan valorisasi dianalisis secara kualitatif berdasarkan potensi pengalihan hasil samping dari aliran residu dan bukti empiris pemanfaatannya, tanpa menghitung persentase penurunan dampak lingkungan.

Analisis dan Interpretasi Data

Data dianalisis secara deskriptif-kuantitatif dan komparatif melalui perhitungan proporsi, nilai dampak, perbandingan hasil penelitian terdahulu, dan penilaian kualitatif potensi valorisasi. Hasil

evaluasi kinerja lingkungan digunakan untuk mengidentifikasi kategori dampak dan tahapan proses yang perlu mendapat perhatian, sedangkan analisis hasil samping digunakan untuk menentukan material yang memiliki peluang pemanfaatan paling besar. Kedua hasil tersebut kemudian diintegrasikan untuk menentukan alternatif valorisasi yang paling prospektif berdasarkan aspek lingkungan, nilai tambah, dan kesiapan teknologi. Interpretasi akhir diarahkan pada kontribusi pemanfaatan hasil samping terhadap keberlanjutan agroindustri sirup kalamansi di Provinsi Bengkulu.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Sistem Produksi Agroindustri Sirup Kalamansi di Provinsi Bengkulu

Jeruk kalamansi (*Citrofortunella microcarpa*) merupakan salah satu komoditas pertanian yang dikembangkan dan diolah menjadi produk bernilai tambah di Provinsi Bengkulu. Salah satu bentuk pengolahannya adalah sirup kalamansi yang telah diproduksi oleh industri rumah tangga di Kota Bengkulu. Hidayat et al. (2018) melaporkan bahwa ketersediaan buah kalamansi di wilayah Kampung Melayu, Kota

Bengkulu, mendorong pelaku usaha untuk mengolahnya menjadi sirup. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa produksi sirup kalamansi telah berkembang pada tingkat industri rumah tangga dan dapat dikaji dari aspek teknis maupun finansial. Karakteristik tersebut memperlihatkan bahwa pengolahan kalamansi merupakan bagian dari kegiatan agroindustri yang mengubah komoditas pertanian segar menjadi produk dengan nilai ekonomi lebih tinggi.

Sistem produksi sirup kalamansi pada dasarnya dimulai dari penerimaan dan penyiapan buah sebagai bahan baku, kemudian dilanjutkan dengan proses pencucian, ekstraksi atau pengepresan sari buah, penyaringan, pencampuran dengan bahan formulasi, pemanasan, dan pengemasan. Hidayat et al. (2018) menggunakan inventarisasi bahan baku, peralatan, tenaga kerja, proses produksi, dan tata letak fasilitas sebagai bagian dari analisis teknis industri sirup kalamansi. Informasi tersebut menunjukkan bahwa proses produksi tidak hanya menentukan jumlah produk akhir, tetapi juga menentukan terbentuknya aliran material lain selama proses pengolahan. Pada tahap ekstraksi dan pemisahan sari buah, bagian buah yang tidak masuk ke dalam produk utama akan keluar sebagai hasil samping. Dengan demikian, karakteristik proses produksi perlu dipahami sebelum mengevaluasi kinerja lingkungan dan peluang pemanfaatan material yang dihasilkan dari setiap tahapan proses.



Gambar 1. Diagram Sistem Produksi dan Aliran Hasil Samping Agroindustri Sirup Kalamansi di Provinsi Bengkulu. Sumber: Diadaptasi dari Hidayat et al. (2018) dan Tutuarima et al. (2018).

Gambar 1 menunjukkan bahwa hasil samping terutama terbentuk pada tahap pemisahan bagian buah dari sari yang digunakan sebagai bahan utama sirup. Tutuarima et al. (2018) secara khusus mengidentifikasi kulit, pulp, biji, dan cairan hasil pengendapan sebagai hasil samping industri sirup jeruk kalamansi. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa hasil samping berbentuk padatan, khususnya kulit dan pulp, masih memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan *concrete*. Temuan tersebut penting karena menunjukkan bahwa material yang keluar dari proses produksi tidak seluruhnya merupakan material yang kehilangan nilai guna. Sebagian di antaranya masih mengandung komponen yang dapat dimanfaatkan melalui proses pengolahan lanjutan.

Potensi tersebut semakin terlihat dari penelitian Rosalina et al. (2017) yang mengkaji ekstraksi pektin dari limbah kulit dan kulit+daging buah kalamansi. Penelitian tersebut memperoleh rendemen pektin sebesar 15,3% dari kulit kalamansi dan 7,82% dari kulit+daging buah kalamansi, dengan kandungan galakturonat pada pektin dari kulit kalamansi mencapai 93,51%. Hasil ini menunjukkan bahwa bagian buah yang sebelumnya berada di luar aliran produk utama masih dapat menjadi sumber bahan bernilai tambah.

Temuan tersebut menjadi dasar penting dalam melihat sistem produksi sirup kalamansi dari perspektif kinerja lingkungan. Agroindustri tidak hanya menghasilkan produk utama, tetapi juga menghasilkan aliran material yang perlu dikelola agar tidak meningkatkan beban lingkungan. Penelitian Fahlin et al. (2025) menunjukkan bahwa agroindustri sirup kalamansi Bengkulu menggunakan sumber daya dan energi serta menghasilkan keluaran berupa limbah padat dan cair dalam keseluruhan daur hidup produk. Penelitian tersebut menggunakan pendekatan LCA untuk mengevaluasi dampak lingkungan produk sirup kalamansi.

Berdasarkan karakteristik tersebut, sistem produksi sirup kalamansi dapat dipandang sebagai sistem agroindustri yang memiliki dua kelompok keluaran, yaitu produk utama dan hasil samping. Pemisahan kedua kelompok keluaran tersebut menjadi penting dalam penelitian ini karena hasil samping tidak hanya akan dianalisis berdasarkan jumlahnya, tetapi juga berdasarkan peluang untuk divalorisasi. Dengan demikian, evaluasi sistem produksi menjadi dasar untuk menghubungkan proses pengolahan, pembentukan hasil samping, kinerja lingkungan, dan peluang pemanfaatan kembali material dalam mendukung keberlanjutan agroindustri sirup kalamansi di Provinsi Bengkulu.

Evaluasi Kinerja Lingkungan Agroindustri Sirup Kalamansi

Evaluasi kinerja lingkungan dilakukan berdasarkan data sekunder hasil *Life Cycle Assessment* (LCA) pada agroindustri sirup kalamansi di Kota Bengkulu. Fahlin et al. (2025) menggunakan pendekatan *cradle-to-grave* dengan unit fungsional 500 mL sirup kalamansi per botol dan metode CML-IA Baseline untuk menilai empat kategori dampak, yaitu *Global Warming Potential* (GWP), *Acidification Potential* (AP), *Eutrophication Potential* (EP), dan *Ozone Layer Depletion Potential* (ODP). Berdasarkan hasil LCA Fahlin et al. (2025), tahap produksi merupakan kontributor utama pada kategori dampak yang dievaluasi, dengan penggunaan gula diidentifikasi sebagai salah satu hotspot utama. Data tersebut digunakan dalam penelitian ini sebagai dasar untuk menggambarkan kinerja lingkungan agroindustri dan selanjutnya dikaitkan dengan peluang perbaikan melalui pemanfaatan hasil samping.

Nilai dampak yang dilaporkan untuk setiap kategori adalah EP sebesar $5,43431 \times 10^{-14}$ kg PO₄-eq/FU, GWP sebesar $4,98483 \times 10^{-14}$ kg CO₂-eq/FU, AP sebesar $3,04384 \times 10^{-14}$ kg SO₂-eq/FU, dan ODP sebesar $1,40336 \times 10^{-15}$ kg CFC-11-eq/FU. Nilai tersebut tidak dibandingkan secara langsung antar-kategori karena masing-masing kategori menggunakan satuan ekuivalen dan mekanisme dampak yang berbeda. Nilai tersebut dikutip dari Fahlin et al. (2025).

Tabel 1. Kinerja Lingkungan Agroindustri Sirup Kalamansi Berdasarkan Kategori Dampak

Kategori dampak	Nilai dampak	Satuan	Kontributor utama	Interpretasi
GWP	4,98483	× kg CO ₂ -	Proses produksi,	Menunjukkan kontribusi
	10 ⁻¹⁴	eq/FU	terutama penggunaan gula	terhadap pemanasan global; tahap produksi menjadi sumber dampak utama.
AP	3,04384	× kg SO ₂ -	Proses produksi,	Menunjukkan potensi pengasaman lingkungan; tahap produksi memberikan kontribusi terbesar.
	10 ⁻¹⁴	eq/FU	terutama penggunaan gula	
EP	5,43431	× kg PO ₄ -	Proses produksi,	Menunjukkan potensi kontribusi terhadap eutrofikasi berdasarkan hasil LCIA yang dilaporkan.
	10 ⁻¹⁴	eq/FU	terutama penggunaan gula	
ODP	1,40336	× kg CFC-11-	Proses produksi,	Merupakan kategori dengan nilai terendah dan menunjukkan potensi kontribusi terhadap penipisan lapisan ozon.
	10 ⁻¹⁵	eq/FU	terutama penggunaan gula	

Sumber: Diolah dari Fahlin et al. (2025).

Catatan: Identifikasi kontributor utama mengikuti hasil hotspot yang dilaporkan oleh Fahlin et al. (2025) dan tidak merupakan hasil inventarisasi primer dalam penelitian ini.

Hasil pada Tabel 1 memperlihatkan bahwa tahap produksi merupakan titik kritis dalam sistem agroindustri sirup kalamansi. Fahlin et al. (2025) mengidentifikasi penggunaan gula sebagai salah satu penyebab utama *hotspot* dampak lingkungan pada tahap tersebut. Temuan ini menunjukkan bahwa perbaikan kinerja lingkungan tidak cukup dilakukan hanya pada pengelolaan hasil samping, tetapi juga perlu mempertimbangkan bahan dan aktivitas yang memberikan kontribusi besar terhadap dampak sepanjang sistem produksi. Dalam penelitian LCA agroindustri ayam potong di Indonesia, proses produksi dan penggunaan energi juga ditemukan sebagai salah satu sumber penting dampak lingkungan, sehingga identifikasi *hotspot* diperlukan sebelum menentukan tindakan perbaikan.

Kondisi tersebut sekaligus memberikan dasar untuk menghubungkan evaluasi kinerja lingkungan dengan potensi valorisasi hasil samping. Hasil samping yang selama ini keluar dari proses produksi dapat menjadi bagian dari strategi pengurangan beban lingkungan apabila dimanfaatkan kembali secara tepat. Tutuarima dan Intara (2020), misalnya, menunjukkan bahwa kulit yang dihasilkan dari industri sirup kalamansi dapat diolah menjadi minyak atsiri menggunakan metode *steam distillation*, dengan rendemen 0,33%. Penelitian tersebut juga menempatkan pemanfaatan kulit sebagai upaya untuk mengurangi permasalahan lingkungan akibat penumpukan limbah kulit di sekitar industri.

Dengan demikian, hasil evaluasi menunjukkan bahwa kinerja lingkungan agroindustri sirup kalamansi masih memiliki ruang untuk diperbaiki, terutama pada tahap produksi yang menjadi *hotspot*. Pada sisi lain, keberadaan hasil samping memberikan peluang intervensi melalui pemanfaatan kembali material yang masih bernilai. Dalam konteks penelitian ini, informasi mengenai GWP, AP, EP, dan ODP tidak digunakan untuk membuat klaim bahwa seluruh dampak dapat dihilangkan melalui valorisasi, tetapi menjadi dasar untuk menilai potensi kontribusi pemanfaatan hasil samping terhadap pengelolaan

lingkungan agroindustri. Pendekatan tersebut membuat analisis berikutnya dapat difokuskan pada jenis hasil samping yang paling tersedia, alternatif pemanfaatannya, serta bukti empiris mengenai nilai tambah dan manfaat lingkungannya.

Identifikasi dan Karakteristik Hasil Samping

Hasil samping merupakan bagian material yang keluar dari proses pengolahan tetapi tidak menjadi bagian dari produk utama. Pada agroindustri sirup kalamansi, hasil samping terutama terbentuk pada tahap ekstraksi, pengepresan, penyaringan, dan pengendapan sari buah. Tutuarima et al. (2018) secara khusus mengidentifikasi hasil samping industri sirup jeruk kalamansi berupa kulit, pulp, biji, dan cairan hasil pengendapan. Temuan tersebut menunjukkan bahwa aliran material pada proses pengolahan kalamansi tidak seluruhnya berakhir sebagai sirup, tetapi menghasilkan beberapa fraksi yang masih memiliki potensi pemanfaatan. Kulit dan pulp merupakan fraksi padat yang berasal dari bagian buah yang tertinggal setelah pengambilan sari, sedangkan biji ikut terpisah bersama material padat selama proses ekstraksi. Cairan hasil pengendapan merupakan fraksi cair yang terpisah dari sari buah selama proses produksi.

Dari sisi karakteristik dan potensi pemanfaatannya, kulit merupakan salah satu hasil samping yang paling prospektif. Rosalina et al. (2017) menunjukkan bahwa limbah kulit kalamansi dapat digunakan sebagai bahan baku ekstraksi pektin dengan rendemen 15,3%, sedangkan bahan berupa campuran kulit dan daging buah menghasilkan rendemen 7,82%. Pektin yang diperoleh dari kulit kalamansi juga memiliki kandungan galakturonat sebesar 93,51%, sehingga menunjukkan kualitas bahan yang cukup baik untuk dikembangkan sebagai produk turunan. Sementara itu, Tutuarima et al. (2018) menunjukkan bahwa fraksi padat berupa kulit dan pulp dapat diekstraksi melalui proses maserasi untuk menghasilkan *concrete*, dengan rendemen maksimum 54,6823% pada kondisi penelitian. Data tersebut memperlihatkan bahwa kulit dan pulp bukan sekadar material buangan, tetapi memiliki komponen yang dapat dipisahkan dan dimanfaatkan kembali melalui proses pengolahan lanjutan.

Biji dan cairan hasil pengendapan memiliki karakteristik yang berbeda sehingga peluang pemanfaatannya juga perlu dianalisis secara terpisah. Pada penelitian Tutuarima et al. (2018), biji diidentifikasi sebagai salah satu hasil samping, tetapi tidak menjadi bahan utama dalam pengujian produksi *concrete*. Oleh karena itu, penelitian ini tidak menetapkan rendemen atau produk turunan tertentu untuk biji apabila belum tersedia data eksperimental yang dapat diverifikasi. Sebaliknya, cairan hasil pengendapan telah menunjukkan potensi pemanfaatan yang lebih jelas. Tutuarima dan Intara (2020) menunjukkan bahwa limbah kulit industri kalamansi dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan minyak atsiri dan bahwa fermentasi alami selama empat hari menghasilkan rendemen minyak yang paling tinggi dalam perlakuan penelitian tersebut. Penelitian lain mengenai cairan hasil samping industri sirup kalamansi juga menunjukkan bahwa fraksi cair hasil pengendapan dapat digunakan sebagai bahan baku produksi minyak atsiri dengan proses hidrodistilasi.

Berdasarkan karakteristik tersebut, hasil samping agroindustri sirup kalamansi memiliki tingkat potensi yang berbeda. Kulit dan pulp memiliki bukti pemanfaatan yang paling kuat, terutama untuk produksi pektin dan *concrete*, sedangkan cairan hasil pengendapan memiliki peluang untuk dimanfaatkan sebagai sumber senyawa volatil atau minyak atsiri. Biji tetap dicatat sebagai hasil samping, tetapi potensi valorisasinya dalam penelitian ini tidak diberikan nilai kuantitatif apabila belum didukung oleh data penelitian yang spesifik. Pendekatan tersebut diperlukan agar analisis potensi valorisasi pada subbab berikutnya hanya menggunakan informasi yang memiliki dasar empiris dan tidak memasukkan estimasi yang tidak dapat diverifikasi. Secara keseluruhan, keberadaan beberapa fraksi hasil samping menunjukkan adanya peluang untuk mengurangi material yang tidak termanfaatkan sekaligus meningkatkan pemanfaatan sumber daya dalam sistem agroindustri sirup kalamansi.

Potensi Valorisasi Hasil Samping Agroindustri Sirup Kalamansi

Hasil identifikasi menunjukkan bahwa hasil samping agroindustri sirup kalamansi tidak seluruhnya merupakan material yang tidak bernilai. Kulit, pulp, biji, dan cairan hasil pengendapan memiliki karakteristik yang berbeda sehingga peluang pemanfaatannya perlu ditentukan berdasarkan

bukti penelitian yang tersedia. Dewi et al. (2016) menunjukkan bahwa hasil samping industri sirup kalamansi dapat dipisahkan menjadi fraksi padat, cairan 1, dan cairan 2, yang seluruhnya masih menghasilkan minyak atsiri melalui proses penyulingan. Dari 100 kg buah kalamansi segar diperoleh 40 kg hasil samping padat, 20 L cairan 1, dan 10 L cairan 2. Minyak atsiri yang diperoleh masing-masing sebesar 300,79 g, 354,39 g, dan 22,33 g. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pemanfaatan hasil samping dapat diarahkan pada produk dengan nilai ekonomi lebih tinggi daripada sekadar pembuangan material sisa. Apabila persamaan proporsi hasil samping diterapkan pada data tersebut, fraksi padat setara dengan 40% dari massa buah kalamansi segar, sedangkan cairan 1 dan cairan 2 dilaporkan dalam satuan volume (20 L dan 10 L per 100 kg buah) sehingga tidak dikonversi menjadi proporsi massa.

Potensi valorisasi juga terlihat pada pemanfaatan kulit dan pulp sebagai sumber bahan baku produk turunan. Rosalina et al. (2017) memperoleh rendemen pektin sebesar 15,30% dari kulit kalamansi dan 7,82% dari campuran kulit dan daging buah, dengan kandungan galakturonat pektin dari kulit kalamansi mencapai 93,51%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kulit kalamansi memiliki karakteristik yang mendukung pemanfaatannya sebagai sumber pektin. Sementara itu, Tutuarima et al. (2018) mengembangkan proses maserasi menggunakan etanol 96% untuk menghasilkan concrete dari kulit dan pulp hasil samping industri sirup kalamansi. Rendemen maksimum yang diperoleh sebesar 54,6823% pada lama maserasi 24 jam dan rasio bahan terhadap pelarut 1:1,75. Temuan tersebut memperkuat bahwa hasil samping padat memiliki lebih dari satu jalur pemanfaatan dan dapat diarahkan sesuai karakteristik bahan serta teknologi yang tersedia.

Potensi pemanfaatan kulit kalamansi juga didukung oleh keberadaan senyawa bioaktif. Amiliah et al. (2021) menunjukkan bahwa ekstrak kasar dan minyak atsiri kulit jeruk kalamansi memiliki aktivitas antibakteri terhadap *Staphylococcus aureus* dan *Escherichia coli*. Temuan tersebut memperluas peluang pemanfaatan kulit kalamansi tidak hanya sebagai sumber bahan ekstraktif, tetapi juga sebagai bahan baku produk yang memiliki fungsi biologis.

Tabel 2. Potensi Valorisasi Hasil Samping Agroindustri Sirup Kalamansi

Hasil samping	Alternatif valorisasi	Produk potensial	Rendemen/hasil	Bukti peneuitan	Potensi
Kulit	Ekstraksi pektin	Pektin	15,30%; galakturonat 93,51%	Rosalina et al. (2017)	Sangat tinggi
Kulit + pulp	Maserasi menggunakan etanol 96%	Concrete	54,6823% dari kulit + pulp	Tutuarima et al. (2018)	Sangat tinggi
Kulit + pulp (fraksi padat)	Hidrodistilasi	Minyak atsiri	0,752% atau 300,79 g/40 kg hasil samping padat	Dewi et al. (2016)	Tinggi
Pulp	Ekstraksi pektin	Pektin	7,82% dari kulit + daging buah	Rosalina et al. (2017) Tutuarima et al. (2018)	Tinggi
Biji	—	—	Belum tersedia data rendemen spesifik	mengidentifikasi biji sebagai hasil samping, tetapi tidak mengujinya secara terpisah	Belum dapat ditentukan
Cairan hasil pengendapan	Hidrodistilasi	Minyak atsiri	1,771% atau 354,39 g/20 L untuk cairan 1; 0,223% atau 22,33 g/10 L untuk cairan 2	Dewi et al. (2016)	Sangat tinggi

Sumber: Diolah dari Dewi et al. (2016), Rosalina et al. (2017), dan Tutuarima et al. (2018).

Berdasarkan Tabel 2, kulit kalamansi mempunyai pilihan valorisasi paling beragam dibandingkan hasil samping lainnya. Kulit dapat diarahkan menjadi pektin, *concrete*, maupun minyak atsiri. Keunggulan pektin terutama terlihat dari rendemen 15,30% dan kandungan galakturonat 93,51% yang dilaporkan Rosalina et al. (2017). Di sisi lain, rendemen *concrete* sebesar 54,6823% yang diperoleh Tutuarima et al. (2018) menunjukkan bahwa proses ekstraksi senyawa larut dari kulit dan pulp juga memiliki prospek yang kuat. Perbedaan hasil tersebut tidak dapat digunakan untuk menyatakan bahwa *concrete* secara langsung lebih unggul daripada pektin karena kedua penelitian menggunakan bahan, metode, parameter proses, dan dasar perhitungan rendemen yang berbeda. Perbandingan dalam penelitian ini digunakan untuk menunjukkan keragaman jalur valorisasi, bukan untuk menyamakan hasil antarproses. Penentuan alternatif yang paling prospektif juga perlu mempertimbangkan kesesuaian teknologi dengan karakteristik bahan yang tersedia. Moreno-González dan Ottens (2021) menunjukkan bahwa pemulihan senyawa bernilai dari *agri-food side streams* perlu mempertimbangkan karakteristik bahan, komponen target, dan teknologi pemisahan yang digunakan. Oleh karena itu, rendemen yang tinggi belum cukup untuk menentukan suatu alternatif sebagai pilihan utama apabila teknologi pengolahannya sulit diterapkan pada kondisi agroindustri yang tersedia.

Cairan hasil pengendapan juga menunjukkan peluang yang penting. Dewi et al. (2016) memperoleh rendemen minyak atsiri sebesar 1,771% dari cairan 1, lebih tinggi dibandingkan fraksi padat sebesar 0,752% dan cairan 2 sebesar 0,223%. Hasil ini menunjukkan bahwa fraksi cair yang terbentuk selama pengolahan tidak dapat langsung dianggap sebagai material yang tidak memiliki nilai. Pemanfaatan hasil samping kalamansi melalui teknologi ekstraksi juga telah dikembangkan pada tingkat penerapan teknologi. Maryanti et al. (2018) menerapkan teknologi ekstraksi fasa cair-gas melalui *steam distillation* untuk memperoleh minyak atsiri dari residu pengolahan sirup kalamansi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa teknologi ekstraksi dapat digunakan untuk mengubah residu pengolahan menjadi produk turunan yang memiliki nilai pemanfaatan. Penelitian yang lebih baru oleh Tutuarima dan Intara (2020) juga menunjukkan bahwa fermentasi alami selama empat hari dapat meningkatkan rendemen minyak atsiri dari limbah kulit kalamansi tanpa mengubah karakteristik mutu minyak secara signifikan. Temuan tersebut memperlihatkan adanya peluang pengembangan teknologi sederhana untuk meningkatkan nilai hasil samping sebelum proses ekstraksi dilakukan.

Sementara itu, biji kalamansi belum dapat ditetapkan sebagai alternatif valorisasi tertentu dalam penelitian ini karena belum ditemukan data eksperimen yang cukup untuk menentukan rendemen dan karakteristik produk turunannya secara spesifik dari hasil samping industri sirup kalamansi. Tutuarima et al. (2018) memang mencatat biji sebagai salah satu hasil samping industri, tetapi penelitian tersebut berfokus pada kulit dan pulp sebagai bahan baku *concrete*. Karena itu, pemberian nilai potensi untuk biji tanpa dukungan data kuantitatif akan menghasilkan kesimpulan yang lemah. Pendekatan ini sekaligus menjaga agar analisis valorisasi tetap berbasis bukti dan tidak mengubah peluang teoritis menjadi klaim hasil penelitian.

Secara keseluruhan, hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kulit, pulp, dan cairan hasil pengendapan memiliki dasar empiris yang cukup kuat untuk dikembangkan sebagai bahan baku produk bernilai tambah. Pilihan valorisasi tidak hanya ditentukan oleh rendemen, tetapi juga oleh karakteristik bahan, kebutuhan proses, teknologi yang tersedia, dan manfaat yang dapat diberikan terhadap pengelolaan hasil samping. Dalam konteks keberlanjutan agroindustri, pemanfaatan tersebut dapat menggeser posisi hasil samping dari material yang harus dibuang menjadi sumber bahan baku sekunder. Schieber (2017) menjelaskan bahwa hasil samping industri pangan memiliki peluang untuk divalorisasi menjadi produk bernilai melalui pemanfaatan komponen yang masih terkandung di dalamnya. Dengan demikian, hasil pada subbab ini menjadi dasar untuk menentukan prioritas valorisasi dan kontribusinya terhadap keberlanjutan agroindustri sirup kalamansi pada subbab berikutnya.

Prioritas Valorisasi dan Kontribusinya terhadap Keberlanjutan

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa prioritas valorisasi perlu ditentukan tidak hanya berdasarkan rendemen produk yang dihasilkan, tetapi juga berdasarkan kemampuan alternatif tersebut dalam mengurangi hasil samping, menghasilkan nilai tambah, memberikan manfaat lingkungan, dan dapat

diterapkan dengan teknologi yang tersedia. Berdasarkan hasil pada Tabel 2, kulit kalamansi memiliki posisi paling prospektif karena telah dibuktikan dapat dimanfaatkan melalui beberapa jalur, terutama ekstraksi pektin, produksi *concrete*, dan ekstraksi minyak atsiri. Rosalina et al. (2017) memperoleh rendemen pektin sebesar 15,30% dari kulit kalamansi dengan kandungan galakturonat 93,51%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kulit memiliki komponen yang dapat dipisahkan menjadi produk bernilai tambah. Dari sisi pemanfaatan material, pengolahan kulit menjadi produk turunan juga memberikan peluang untuk mengurangi jumlah biomassa yang harus dikelola sebagai residu.

Pulp memiliki potensi yang relatif tinggi karena dapat dimanfaatkan bersama kulit untuk menghasilkan *concrete* maupun sebagai sumber pektin. Tutuarima et al. (2018) melaporkan rendemen *concrete* maksimum sebesar 54,6823% dari bahan kulit dan pulp pada kondisi ekstraksi yang diteliti. Sementara itu, fraksi cair hasil pengendapan juga menunjukkan peluang valorisasi yang kuat karena Dewi et al. (2016) memperoleh minyak atsiri dari fraksi cair tersebut dengan rendemen 1,771% pada cairan 1 dan 0,223% pada cairan 2. Hasil ini menunjukkan bahwa setiap fraksi hasil samping mempunyai karakteristik yang berbeda dan tidak dapat diperlakukan dengan satu metode pemanfaatan yang sama. Oleh karena itu, strategi valorisasi perlu disesuaikan dengan karakteristik bahan dan tujuan pemanfaatannya, bukan semata-mata memilih alternatif berdasarkan rendemen tertinggi. Pertimbangan tersebut sejalan dengan pendekatan valorisasi hasil samping agroindustri yang menempatkan residu sebagai sumber bahan baku sekunder. Gómez-García et al. (2021) menjelaskan bahwa hasil samping agroindustri pangan masih dapat mengandung komponen bernilai yang dapat dipulihkan melalui proses pengolahan yang sesuai. Pemanfaatan tersebut dapat mengurangi beban pengelolaan residu sekaligus membuka peluang pembentukan produk dan nilai ekonomi baru.

Dari perspektif keberlanjutan, pemanfaatan hasil samping memberikan peluang untuk meningkatkan efisiensi sumber daya karena material yang sebelumnya keluar dari aliran produk utama dapat dikembalikan ke dalam kegiatan produksi sebagai bahan baku sekunder. Galanakis (2015) menjelaskan bahwa pendekatan valorisasi hasil samping pangan dapat diarahkan untuk memperoleh senyawa atau produk bernilai tambah sekaligus mengurangi beban pengelolaan residu. Dalam konteks agroindustri sirup kalamansi, pendekatan tersebut menjadi relevan dengan hasil evaluasi LCA pada subbab sebelumnya, terutama karena tahap produksi merupakan salah satu sumber kontribusi dampak lingkungan. Namun, penelitian ini tidak menghitung besarnya penurunan GWP, AP, EP, dan ODP akibat masing-masing skenario valorisasi karena data LCA sekunder yang tersedia belum menyediakan inventori lengkap untuk setiap alternatif pemanfaatan. Oleh sebab itu, kontribusi lingkungan dalam penelitian ini dinyatakan berdasarkan bukti empiris pemanfaatan hasil samping dan potensi pengurangan material yang tidak termanfaatkan, tanpa membuat estimasi pengurangan dampak yang tidak didukung data. Perlu dicatat bahwa valorisasi hasil samping tidak secara langsung menangani hotspot penggunaan gula pada tahap produksi, sehingga manfaat lingkungannya bersifat tidak langsung (pengurangan residu) dan belum dapat dikuantifikasi.

Berdasarkan kekuatan bukti empiris, ekstraksi pektin dari kulit dan pemanfaatan kulit-pulp menjadi *concrete* merupakan alternatif yang paling kuat, sedangkan pemanfaatan fraksi cair untuk menghasilkan minyak atsiri juga prospektif. Biji belum dapat ditempatkan dalam prioritas karena belum tersedia data eksperimental yang memadai mengenai rendemen dan produk turunannya dari sistem industri sirup kalamansi. Prioritas tersebut menunjukkan bahwa keberlanjutan agroindustri kalamansi dapat dikembangkan melalui beberapa jalur valorisasi yang saling melengkapi. Dengan demikian, valorisasi hasil samping tidak hanya berfungsi sebagai strategi pengelolaan residu, tetapi juga dapat menjadi bagian dari pengembangan agroindustri kalamansi yang lebih efisien dalam menggunakan sumber daya dan menghasilkan nilai tambah.

Implikasi terhadap Keberlanjutan Agroindustri Sirup Kalamansi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa keberlanjutan agroindustri sirup kalamansi di Provinsi Bengkulu berkaitan erat dengan kemampuan sistem produksi dalam mengelola seluruh aliran material, bukan hanya menghasilkan produk utama. Hasil evaluasi lingkungan pada penelitian ini menunjukkan bahwa tahap produksi memberikan kontribusi pada beberapa kategori dampak lingkungan, sementara

pada saat yang sama proses pengolahan menghasilkan kulit, pulp, biji, dan cairan hasil pengendapan yang masih memiliki potensi untuk dimanfaatkan. Kondisi tersebut menunjukkan adanya peluang untuk menghubungkan pengelolaan hasil samping dengan peningkatan efisiensi pemanfaatan sumber daya. Rosalina et al. (2017) membuktikan bahwa limbah kulit dan kulit+daging buah kalamansi dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pektin, dengan rendemen masing-masing 15,30% dan 7,82%. Temuan tersebut memperlihatkan bahwa material yang keluar dari aliran produk utama masih dapat dikembalikan ke dalam kegiatan ekonomi melalui proses pengolahan lanjutan.

Dari aspek pengelolaan sumber daya, hasil penelitian memberikan dasar untuk mengembangkan sistem agroindustri yang tidak hanya berorientasi pada produk utama, tetapi juga mempertimbangkan pemanfaatan hasil samping sebagai bahan baku sekunder. Tutuarima et al. (2018) menunjukkan bahwa kulit dan pulp hasil samping industri sirup kalamansi dapat diolah melalui proses maserasi untuk menghasilkan *concrete*. Penelitian tersebut juga mengidentifikasi kulit, pulp, biji, dan cairan hasil pengendapan sebagai hasil samping industri sirup kalamansi. Dengan demikian, penerapan valorisasi dapat diarahkan secara berbeda sesuai karakteristik masing-masing fraksi. Kulit dapat diprioritaskan untuk menghasilkan pektin atau produk ekstraktif, kulit dan pulp dapat dimanfaatkan untuk *concrete*, sedangkan fraksi lain perlu dikembangkan berdasarkan ketersediaan bukti teknologi. Pendekatan ini sejalan dengan Nattassha et al. (2020), yang menunjukkan bahwa penerapan ekonomi sirkular pada rantai pasok pangan dapat dilakukan dengan mengubah hasil samping yang sebelumnya dibuang menjadi input bagi proses atau produk lain.

Implikasi ekonomi dari pendekatan tersebut terletak pada peluang menghasilkan nilai tambah dari material yang sebelumnya tidak menjadi produk utama. Namun, hasil penelitian ini belum dapat menyatakan besarnya keuntungan ekonomi dari masing-masing alternatif karena data biaya investasi, biaya operasi, harga produk hasil valorisasi, dan skala produksi belum tersedia secara seragam pada seluruh sumber. Oleh karena itu, nilai tambah dalam penelitian ini diposisikan sebagai potensi, bukan sebagai keuntungan aktual. Pendekatan tersebut penting untuk menjaga konsistensi antara data yang tersedia dan kesimpulan penelitian. Dari perspektif pengembangan agroindustri, hasil samping yang telah terbukti dapat diolah menjadi produk bernilai memberikan dasar untuk penelitian lanjutan mengenai kelayakan teknis dan ekonomi pada skala industri. Gagasan tersebut sejalan dengan D'Amato et al. (2020), yang menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah dan hasil samping pertanian dapat dikembangkan melalui model bisnis sirkular yang menghubungkan proses pemanfaatan biomassa dengan penciptaan nilai baru.

Dengan demikian, keberlanjutan agroindustri sirup kalamansi tidak hanya ditentukan oleh peningkatan efisiensi proses produksi, tetapi juga oleh kemampuan mengelola hasil samping secara produktif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa valorisasi kulit dan pulp memiliki dasar empiris paling kuat, sedangkan pemanfaatan fraksi lain masih membutuhkan penelitian lebih lanjut. Strategi tersebut dapat mendukung pengurangan material yang tidak termanfaatkan, meningkatkan pemanfaatan sumber daya, dan membuka peluang diversifikasi produk. Namun, manfaat lingkungan dari setiap alternatif belum dapat dinyatakan dalam bentuk persentase penurunan GWP, AP, EP, atau ODP karena belum tersedia inventori LCA yang lengkap untuk masing-masing skenario valorisasi. Oleh karena itu, penelitian ini menempatkan valorisasi sebagai strategi potensial untuk meningkatkan keberlanjutan agroindustri, sementara pembuktian kuantitatif terhadap pengurangan dampak lingkungan dan kelayakan ekonominya menjadi agenda penelitian berikutnya.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa agroindustri sirup kalamansi di Provinsi Bengkulu memiliki kinerja lingkungan yang perlu diperhatikan sekaligus peluang pemanfaatan hasil samping yang cukup besar. Berdasarkan data *Life Cycle Assessment* (LCA) sekunder dengan unit fungsional 500 mL sirup kalamansi per botol, nilai Global Warming Potential (GWP) sebesar $4,98483 \times 10^{-14}$ kg CO₂-eq/FU, Acidification Potential (AP) sebesar $3,04384 \times 10^{-14}$ kg SO₂-eq/FU, Eutrophication Potential (EP) sebesar $5,43431 \times 10^{-14}$ kg PO₄-eq/FU, dan Ozone Layer Depletion Potential (ODP) sebesar $1,40336 \times$

10⁻¹⁵ kg CFC-11-eq/FU. Tahap produksi, terutama penggunaan gula, menjadi kontributor utama dampak lingkungan. Proses produksi juga menghasilkan kulit, pulp, biji, dan cairan hasil pengendapan sebagai hasil samping yang perlu dikelola secara lebih produktif.

Potensi valorisasi paling kuat ditemukan pada kulit melalui ekstraksi pektin serta pada kombinasi kulit dan pulp untuk menghasilkan concrete, sedangkan fraksi cair hasil pengendapan berpotensi dimanfaatkan untuk menghasilkan minyak atsiri. Kulit menghasilkan rendemen pektin sebesar 15,30% dengan kandungan galakturonat 93,51%, sementara campuran kulit dan pulp menghasilkan concrete dengan rendemen maksimum 54,6823% berdasarkan penelitian terdahulu. Hasil tersebut menunjukkan bahwa valorisasi hasil samping berpotensi mengurangi jumlah material yang tidak termanfaatkan, meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya, dan membuka peluang nilai tambah bagi agroindustri. Namun, penelitian ini belum menghitung secara kuantitatif pengurangan dampak lingkungan akibat setiap skenario valorisasi karena keterbatasan inventori LCA sekunder. Dengan demikian, ekstraksi pektin dari kulit serta pemanfaatan kombinasi kulit dan pulp untuk menghasilkan concrete merupakan alternatif valorisasi yang memiliki bukti empiris paling kuat untuk mendukung keberlanjutan agroindustri sirup kalamansi di Provinsi Bengkulu, sedangkan pemanfaatan fraksi cair untuk menghasilkan minyak atsiri masih perlu dikaji lebih lanjut dari aspek kelayakan teknis dan ekonomi.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiansyah, J. S., Ningrum, N. P., Pratiwi, D., & Hadiyanto, H. (2019). Kajian daur hidup (*Life Cycle Assessment*) dalam produksi pupuk urea: Studi kasus PT Pupuk Kujang. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 17(3), 522–527. <https://doi.org/10.14710/jil.17.3.522-527>
- Amiliah, A., Nurhamidah, N., & Handayani, D. (2021). Aktivitas antibakteri kulit buah jeruk Kalamansi (*Citrofortunella microcarpa*) terhadap bakteri *Staphylococcus aureus* dan *Escherichia coli*. *ALOTROP*, 5(1). <https://doi.org/10.33369/atp.v5i1.16493>
- Dewi, K. H., Mujiharjo, S., & Utama, A. P. (2016). Potensi pengolahan hasil samping sirup kalamansi menuju “zero waste”. *Jurnal Agroindustri*, 6(1), 1–9.
- Fahlin, D. K., Ismayana, A., & Romli, M. (2025). *Analisis penilaian daur hidup (Life Cycle Assessment) produk sirup kalamansi (Citrus microcarpa) Bengkulu* [Tesis, Institut Pertanian Bogor]. IPB University Scientific Repository.
- Gómez-García, R., Campos, D. A., Aguilar, C. N., Madureira, A. R., & Pintado, M. (2021). Valorisation of food agro-industrial by-products: From the past to the present and perspectives. *Journal of Environmental Management*, 299, 113571. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113571>
- Hidayat, L., Darmatama, I., Dany, Y., & Djamilah, D. (2018). Technical and financial analysis on production of calamansi syrup: A case study on “Segar Asri” home industry in Kampung Melayu Bengkulu City. *Jurnal Agroindustri*, 8(1), 11–25. <https://doi.org/10.31186/j.agroindustri.8.1.11-25>
- Maryanti, E., Fitriani, D., & Wirahmi, N. (2018). Penerapan teknologi ekstraksi fasa cair-gas pada pengembangan produk berbasis jeruk kalamansi. *Dharma Raflesia: Jurnal Ilmiah Pengembangan dan Penerapan IPTEKS*, 16(2). <https://doi.org/10.33369/dr.v16i2.6454>
- Moreno-González, M., & Ottens, M. (2021). A structured approach to recover valuable compounds from agri-food side streams. *Food and Bioprocess Technology*, 14, 1387–1406. <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02647-6>
- Nattassha, R., Handayati, Y., Simatupang, T. M., & Siallagan, M. (2020). Understanding circular economy implementation in the agri-food supply chain: The case of an Indonesian organic fertiliser producer. *Agriculture & Food Security*, 9, Article 10. <https://doi.org/10.1186/s40066-020-00264-8>
- Rosalina, Y., Susanti, L., & Karo, N. B. (2017). Kajian ekstraksi pektin dari limbah jeruk Rimau Gerga Lebung (jeruk RGL) dan jeruk kalamansi. *Agrointek: Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 11(2), 68–75. <https://doi.org/10.21107/agrointek.v11i2.3174>

- Schieber, A. (2017). Side streams of plant food processing as a source of valuable compounds: Selected examples. *Annual Review of Food Science and Technology*, 8, 97–112. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030216-030135>
- Tutuarima, T., Dewi, K. H., & Sinambela, N. (2018). Optimasi proses maserasi hasil samping industri sirup jeruk kalamansi (*Citrofortunella microcarpa*). *Jurnal Ilmiah Teknologi Pertanian Agrotechno*, 3(2), 358–363. <https://doi.org/10.24843/JITPA.2018.v03.i02.p07>
- Tutuarima, T., & Intara, Y. I. (2020). Pengaruh lama fermentasi alami terhadap rendemen dan karakteristik minyak atsiri dari limbah kulit jeruk kalamansi (*Citrofortunella microcarpa*). *Jurnal Agroekoteknologi*, 12(1), 1–10.