

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian yang Relevan

Tabel 2. 1 Penelitian yang Relevan

No	Penulis & Tahun	Judul Penelitian	Metode & Sampel	Variabel yang Dikaji	Hasil Utama	Kaitan dengan Penelitian Ini	Gap Penelitian
1	Wahyudi & Garniwa (2021)	<i>Economic and Financial Analysis of Cofiring the Coal Fired Steam Power Plant Capacity 660 MW with Biomass (Sawdust)</i>	Deskriptif Kuantitatif & Uji Lapangan. Objek: PLTU 660 MW (beban operasi 635 MW).	Biaya Pokok Produksi (Komponen C/Bahan Bakar), SFC, Emisi, Kinerja Utama (Main Steam Temp/Pressures).	<i>Co-firing</i> 5% serbuk gergaji menurunkan SFC dari 0,6366 menjadi 0,6289 kg/kWh. Penghematan biaya bahan bakar mencapai Rp35,32 miliar/tahun dengan penurunan emisi SO ₂ dan NO _x .	Membuktikan bahwa <i>co-firing</i> menurunkan biaya operasional bahan bakar (OpEx).	Fokus pada PLTU 660 MW dan hanya menghitung penghematan biaya bahan bakar (Komponen C), belum menghitung kelayakan investasi menyeluruh (NPV, IRR, LCOE) untuk kapasitas 315 MW.
2	Efendi & Garniwa (2022)	<i>Engineering And Economic Analysis of Sawdust Biomass Processing As A Co-firing Fuel In Coal-Fired Power Plant Boiler</i>	Metode: Analisis Tekno-Ekonomi (NPV, IRR, Payback Period, Analisis Sensitivitas).	Potensi ketersediaan biomassa, spesifikasi teknis (nilai kalor), Biaya Pokok Produksi (HPP)	Penerapan <i>co-firing</i> 5% di PLTU Rembang membutuhkan 327 ton biomassa/hari. Bisnis penyedia	Sangat Relevan. Objek penelitian memiliki spesifikasi identik (PLTU 315 MW, <i>Pulverized Coal</i>). Hasil	Penelitian ini lebih berfokus pada kelayakan investasi pabrik pengolahan biomassa (sisi <i>supplier</i>), sedangkan penelitian saat ini berfokus

No	Penulis & Tahun	Judul Penelitian	Metode & Sampel	Variabel yang Dikaji	Hasil Utama	Kaitan dengan Penelitian Ini	Gap Penelitian
		<i>Pulverized Coal Type</i>	Sampel: PLTU Rembang (2x315 MW) tipe <i>Pulverized Coal</i> dengan biomassa <i>sawdust</i> (serbuk gergaji).	biomassa, NPV, IRR, <i>Payback Period</i> , dan sensitivitas harga.	n <i>sawdust</i> dinyatakan layak jika harga jual ke PLTU sebesar Rp 862.730/toton, menghasilkan NPV > Rp 5,2 Miliar, IRR 11,1%, dan PP 7,7 tahun. Faktor paling sensitif adalah rendemen dan harga kayu.	penelitian ini menjadi acuan valid untuk asumsi harga beli biomassa dan <i>benchmark</i> kelayakan finansial.	pada dampak finansial pada operasional PLTU (sisi <i>buyer</i>) melalui perhitungan LCOE dan profitabilitas pembangkit secara menyeluruh.
3	Arifin dkk., 2023	<i>Techno-Economic Analysis of Co-firing for Pulverized Coal Boilers Power Plant in Indonesia</i>	Pilot <i>co-firing</i> 5% biomassa pada 3 PLTU PC di Indonesia (observasi teknis & biaya)	Efisiensi, FEGT, karakteristik bahan bakar, generating cost (GC), emisi SO ₂ /NO _x	Efisiensi berubah linear dgn nilai kalor biomassa; FEGT tak signifikan; GC naik ≈0,25 US\$/kWh; potensi reduksi SO ₂ 1,88–34%	Menguatkan bahwa biaya/kinerja sangat dipengaruhi mutu energi biomassa → relevan untuk banding LCOE antar biomassa	Hanya menganalisis skenario 5% (tidak 10%). Metrik yang digunakan adalah Generating Cost (GC), bukan LCOE, NPV, dan IRR secara komprehensif, serta tidak membahas potensi bisnis rantai pasok.

No	Penulis & Tahun	Judul Penelitian	Metode & Sampel	Variabel yang Dikaji	Hasil Utama	Kaitan dengan Penelitian Ini	Gap Penelitian
4	Dwijati, 2023	Analisis Pengaruh <i>Co-firing</i> Biomassa Terhadap Kinerja Peralatan Boiler PLTU Batubara Unit 1 PT XYZ	Observasi operasi + perbandingan dgn data benchmark/commissioning	SFC, NPHR, kinerja peralatan bantu, biaya produksi	Biaya produksi turun 485,324 → 484,585 Rp/kWh saat <i>co-firing</i> ; kinerja peralatan tetap dalam batas wajar	Mengindikasikan rasio rendah bisa menekan biaya operasional → relevan untuk basis perbandingan LCOE	Fokus utama pada "kinerja peralatan boiler". Analisis finansial hanya sebatas "biaya produksi", tidak menghitung LCOE, NPV, atau IRR, dan tidak menganalisis potensi bisnis.
5	Destalia & Aryan, 2024	Analisa Karakteristik Pengujian <i>Co-firing</i> Biomassa Bagasse di PLTU Rembang 2×315 MW	Uji lapangan 1,25% & 2,5% bagasse; beban 315 MW; evaluasi teknis, biaya, emisi	Nilai kalor bagasse, SO ₂ /NO _x , biaya produksi listrik	NO _x lebih rendah dari 100% batubara; SO ₂ turun (1,25%) lalu naik (2,5%); biaya listrik <i>co-firing</i> lebih murah dari 100% batubara; rujukan HPT	Konteks kapasitas mendekati 315 MW; menunjukkan biaya bisa turun pada rasio rendah	Menganalisis rasio yang sangat rendah (1,25% dan 2,5%), bukan 5% dan 10%. Metrik masih sebatas "biaya produksi" dan SFC, belum analisis LCOE, NPV, dan IRR.
6	Rezadkk., 2025	<i>Techno-economic Analysis of Biomass Co-firing Application on Indonesia 660 MW Class</i>	Studi kasus PLTU Suralaya 660 MW; analisis biaya & regulasi	Intensitas emisi, LCOE, potensi beban pajak karbon, kebutuhan	Rasio 5% menurunkan LCOE ≈ 0,36 IDR/kWh; di atasnya LCOE cenderung naik; cap	Dasar empiris bahwa rasio kecil bisa ekonomis → relevan sebagai	Objek penelitian berbeda. Fokus penelitian ini adalah PLTU kelas 660 MW, bukan 315 MW.

No	Penulis & Tahun	Judul Penelitian	Metode & Sampel	Variabel yang Dikaji	Hasil Utama	Kaitan dengan Penelitian Ini	Gap Penelitian
		<i>Subcritical CFPP</i>	cap emisi	retrofit ringan	emisi 0,911 tCO ₂ /MWh untuk ≥ 400 MW	pembandingan skenario 0/5/10%	
7	Prabawa & Sidqi (2025).	Kajian Kelayakan Teknik dan Finansial Proyek PLTS di Pulau Padang Tikar.	Analisis kelayakan finansial menggunakan indikator LCOE, NPV, IRR, dan Payback Period pada proyek energi terbarukan.	LCOE, NPV, IRR, dan Payback Period	Proyek layak dengan LCOE Rp4.099/kWh dan NPV positif.	Menjadi rujukan validasi untuk penggunaan metode Discounted Cash Flow (DCF) dan LCOE dalam mengevaluasi kelayakan proyek transisi energi di Indonesia.	Objek penelitian adalah PLTS (Variable Renewable Energy), sedangkan penelitian ini berfokus pada PLTU <i>Co-firing</i> (Base Load) dengan analisis tambahan pada rantai pasok biomassa.
8	Hardianto & Sidqi (2026)	Analisis Kelayakan Proyek Pembangunan PLTM Walesi Cascade Secara Nilai Ekonomi Ketenagalistrikan Dan Potensi Kredit Karbon	Metode: Kuantitatif Deskriptif (Analisis Kelayakan Ekonomi & Lingkungan). Sampel: PLTM	LCOE, NPV, IRR, Benefit-Cost Ratio (BCR), Break Even Point (BEP), Rate of Return (RoR), dan Potensi	LCOE sebesar 8,39 sen USD/kWh ; NPV positif USD 1,7 Juta; IRR 11,04% (layak); BEP tercapai pada 8,9 tahun.	Menjadi rujukan utama metodologi analisis finansial (menggunakan metrik LCOE, NPV, IRR, BEP) untuk proyek	Gap penelitian ini terletak pada perbedaan objek di mana penelitian terdahulu mengkaji pembangunan unit baru (greenfield) PLTM 5,7 MW, sedangkan penelitian ini

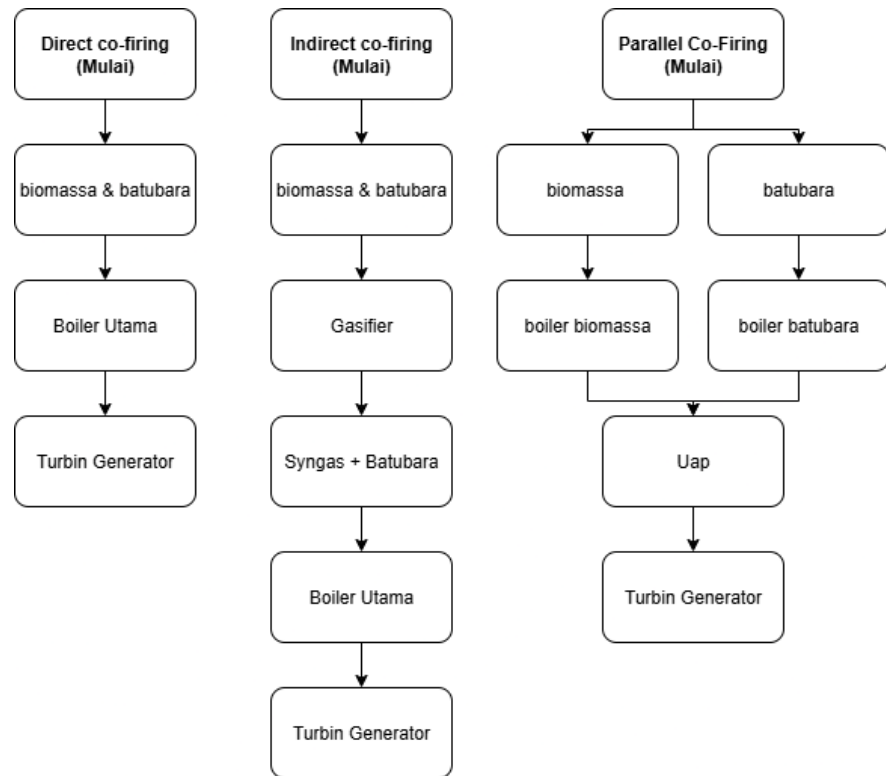
No	Penulis & Tahun	Judul Penelitian	Metode & Sampel	Variabel yang Dikaji	Hasil Utama	Kaitan dengan Penelitian Ini	Gap Penelitian
			Walesi Cascade (Kapasitas 5,7 MW) di Papua.	Pendapatan Kredit Karbon (VCM).		energi dalam kerangka Net Zero Emission (NZE) yang divalidasi oleh Dosen Pembimbing yang sama.	mengkaji retrofit program <i>co-firing</i> pada PLTU eksisting berkapasitas 315 MW

Sumber : Data diolah peneliti

2.2. Landasan Teori

2.2.1. Konsep Dasar *Co-firing* Biomassa.

Co-firing biomassa merupakan teknologi pembangkitan listrik yang memanfaatkan pencampuran bahan bakar batubara dengan biomassa pada proses pembakaran yang sama. Teknologi ini muncul sebagai salah satu strategi penting dalam transisi energi menuju sistem kelistrikan rendah karbon. Xu et al. (2020) menjelaskan bahwa *co-firing* mampu menurunkan emisi gas rumah kaca hingga 76 % dibandingkan pembakaran batubara murni, tergantung pada jenis biomassa dan rasio campurannya. Biomassa menghasilkan emisi SO₂ dan NO_x yang jauh lebih rendah karena kandungan sulfur dan nitrogen yang kecil, sehingga memberikan keuntungan lingkungan tanpa perubahan besar pada sistem pembangkit yang sudah ada.



Gambar 2. 1 Klasifikasi Teknologi Co-firing Biomassa

Secara teknis, terdapat tiga pendekatan utama dalam implementasi *co-firing*: *direct co-firing*, *indirect co-firing*, dan *gasification co-firing*. Xu et al. (2020) menegaskan bahwa *direct co-firing* merupakan metode yang paling banyak digunakan karena sederhana dan murah—biomassa dicampur langsung dengan batubara sebelum masuk ke ruang bakar boiler. Pada rasio campuran hingga 10 %, modifikasi peralatan yang dibutuhkan sangat minim. Namun, untuk rasio lebih tinggi (15–20 %), dibutuhkan sistem penggilingan, pengeringan, dan penyimpanan biomassa yang terpisah. Hasil studi menunjukkan bahwa setiap kenaikan rasio *co-firing* menyebabkan peningkatan LCOE sekitar 8–19 %, tergantung kadar energi biomassa dan jenis boiler yang digunakan.

Dari sisi ekonomi, hasil simulasi Xu et al. (2020) menunjukkan bahwa biaya produksi listrik berbasis wood chips meningkat sebesar 5,71 %, sedangkan dengan rice husk justru dapat menurun sekitar 6,06 % dibandingkan batubara murni. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik fisik dan kimia biomassa—khususnya nilai kalor dan kadar abu—menjadi faktor utama yang menentukan efisiensi dan biaya. Penelitian ini menegaskan bahwa *co-firing* paling layak

diterapkan pada rasio rendah (5–10 %) karena masih mempertahankan efisiensi termal dan stabilitas pembakaran tanpa memerlukan investasi retrofit besar.

Dalam konteks implementasi global, Xu et al. (2020) mencatat bahwa negara-negara seperti Belanda, Finlandia, dan Inggris telah berhasil menerapkan *co-firing* skala besar dengan rasio hingga 30 %, menghasilkan efisiensi unit di atas 47 %. Indonesia mulai mengikuti arah tersebut dengan program PLN untuk menerapkan *co-firing* di lebih dari 30 PLTU dengan bahan bakar seperti cangkang sawit dan sekam padi (Arifin et al., 2023). Hal ini menunjukkan bahwa *co-firing* merupakan solusi cepat dan ekonomis untuk meningkatkan porsi energi terbarukan di sektor kelistrikan tanpa perlu membangun pembangkit baru, sekaligus mendukung target nasional Net Zero Emission 2060.

2.2.2. Definisi dan Klasifikasi Biomassa

1. Definisi Biomassa

Biomassa merupakan bahan organik yang berasal dari makhluk hidup seperti tanaman, hewan, atau mikroorganisme yang dapat digunakan sebagai sumber energi terbarukan. Menurut Saidur et al. (2011), biomassa didefinisikan sebagai bahan organik yang dihasilkan melalui proses fotosintesis dan dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk menghasilkan panas dan listrik melalui proses pembakaran langsung atau konversi termokimia. Tursi (2019) menambahkan bahwa biomassa mencakup seluruh material organik yang berasal langsung maupun tidak langsung dari proses fotosintesis, termasuk kayu, residu pertanian, alga, dan limbah organik. Biomassa dianggap carbon-neutral karena karbon yang dilepaskan selama pembakaran akan diserap kembali oleh tanaman baru melalui fotosintesis.

Dalam konteks energi, biomassa memiliki peran penting sebagai alternatif pengganti bahan bakar fosil karena sifatnya yang terbarukan, mudah diperoleh secara lokal, dan mampu menurunkan emisi CO₂ serta gas rumah kaca lainnya. Energi yang terkandung dalam biomassa

umumnya dihitung berdasarkan nilai kalor (calorific value), yang bervariasi tergantung pada jenis dan kadar air bahan baku. Nilai kalor biomassa umumnya lebih rendah dibanding batubara, yaitu sekitar 2.000–4.500 kcal/kg, namun keunggulannya terletak pada ketersediaan dan dampak lingkungannya yang lebih kecil (Saidur et al., 2011).

2. Klasifikasi Biomassa

Klasifikasi biomassa dapat dilakukan berdasarkan asal bahan, komposisi kimia, maupun bentuk fisiknya. Tursi (2019) membagi biomassa menjadi lima kelompok besar, yaitu:

1) Biomassa Kayu dan Lignoselulosa (*Wood and Woody Biomass*)

Termasuk kayu gelondongan, serpihan kayu (wood chips), dan limbah industri kehutanan. Biomassa ini mengandung lignin dan selulosa tinggi dengan kadar air rendah, sehingga menghasilkan nilai kalor tinggi dan efisien untuk pembakaran di boiler PLTU.

2) Biomassa Herbaceous (*Herbaceous Biomass*)

Meliputi tanaman pertanian seperti jerami padi, tongkol jagung, dan sekam padi. Jenis ini memiliki kadar air dan abu lebih tinggi dibanding kayu, sehingga memerlukan perlakuan khusus dalam penyimpanan dan pembakaran.

3) Biomassa Akuatik (*Aquatic Biomass*)

Berasal dari alga laut atau air tawar. Potensinya besar karena tingkat pertumbuhannya cepat dan tidak bersaing dengan lahan pangan, namun masih membutuhkan teknologi konversi yang lebih efisien.

4) Biomassa dari Limbah Hewan dan Manusia (*Animal and Human Waste Biomass*)

Contohnya limbah peternakan, kotoran ternak, atau limbah organik domestik (Sampah makanan, Kertas dan kertas karton serta Feses/kotoran padat). Biasanya digunakan untuk menghasilkan biogas melalui proses fermentasi anaerob.

5) Campuran Biomassa (*Biomass Mixtures*)

Kombinasi berbagai jenis biomassa yang diolah untuk meningkatkan efisiensi energi, misalnya campuran antara palm kernel shell (PKS) dan serbuk kayu yang memiliki kandungan energi lebih stabil.

Menurut Saidur et al. (2011), biomassa juga dapat dikategorikan berdasarkan komposisi kimianya menjadi tiga komponen utama, yaitu selulosa (40–60%), hemiselulosa (20–40%), dan lignin (10–25%). Ketiga komponen ini menentukan karakteristik pembakaran biomassa, di mana kandungan lignin yang tinggi meningkatkan densitas energi dan kestabilan pembakaran. Selain itu, kandungan air dan abu juga memengaruhi nilai kalor serta risiko *fouling* pada boiler.

2.2.3. Konsep Biaya Pembangkitan Listrik (*Levelized Cost of Electricity – LCOE*)

Biaya pembangkitan listrik atau *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) merupakan indikator yang banyak digunakan untuk menilai efisiensi ekonomi suatu teknologi pembangkit listrik. LCOE menggambarkan rata-rata biaya yang diperlukan untuk menghasilkan satu kilowatt-jam (kWh) listrik selama umur operasi pembangkit, dengan memperhitungkan seluruh komponen biaya yang dikeluarkan selama siklus hidup proyek. Nilai ini memungkinkan perbandingan yang adil antara berbagai teknologi pembangkitan, baik berbasis batubara, gas, maupun energi terbarukan seperti biomassa dan surya (Shen et al., 2020).

Shen et al. (2020) dalam jurnal *A Comprehensive Review of Variable Renewable Energy Levelized Cost of Electricity* menjelaskan bahwa LCOE menjadi tolok ukur utama dalam menentukan daya saing antar sumber energi.

Pendekatan ini memperhitungkan seluruh biaya yang dikeluarkan pembangkit—mulai dari investasi awal (*capital expenditure*), biaya operasi dan pemeliharaan, hingga biaya bahan bakar—kemudian dibandingkan dengan total energi listrik yang dihasilkan sepanjang umur ekonomisnya. Dengan demikian, LCOE memberikan gambaran yang menyeluruh mengenai efisiensi biaya pembangkitan tanpa harus memasuki analisis finansial yang kompleks.

2.2.4. Konsep Penganggaran Modal (*Capital Budgeting*)

Capital budgeting (penganggaran modal) adalah proses perencanaan fundamental yang digunakan perusahaan untuk mengevaluasi dan membuat keputusan terkait alokasi sumber daya ke dalam proyek-proyek investasi jangka panjang (Michelon, Lunkes, & Bornia, 2020). Proses ini dianggap sebagai salah satu keputusan paling krusial bagi manajemen keuangan karena secara langsung memengaruhi tingkat pertumbuhan dan profitabilitas perusahaan di masa depan (Michelon, Lunkes, & Bornia, 2020). Tujuan utamanya adalah untuk menilai apakah arus kas masa depan yang diproyeksikan dari sebuah investasi dapat membenarkan pengeluaran modal awal, dengan mempertimbangkan berbagai risiko dan ketidakpastian yang ada (Michelon, Lunkes, & Bornia, 2020).

Dalam praktiknya, terdapat berbagai teknik untuk mengevaluasi kelayakan investasi, yang secara umum diklasifikasikan menjadi dua kategori: metode canggih (*sophisticated*) dan metode sederhana (Michelon, Lunkes, & Bornia, 2020). Metode canggih, seperti *Net Present Value* (NPV) dan *Internal Rate of Return* (IRR), didasarkan pada konsep *Discounted Cash Flow* (DCF) yang secara teoretis lebih unggul karena memperhitungkan nilai waktu dari uang (*time value of money*) (Michelon, Lunkes, & Bornia, 2020). Sebaliknya, metode sederhana seperti *Payback Period* (PP) lebih sering digunakan dalam praktik karena kemudahannya dalam perhitungan dan pemahaman, meskipun memiliki kelemahan karena mengabaikan nilai waktu uang serta arus kas yang terjadi setelah periode pengembalian modal tercapai (Michelon, Lunkes, & Bornia, 2020).

Meskipun kalangan akademisi sangat merekomendasikan penggunaan metode canggih seperti NPV dan IRR, terdapat kesenjangan yang signifikan antara teori dan praktik, di mana banyak manajer masih mengandalkan metode sederhana seperti *Payback Period* (Michelon, Lunkes, & Bornia, 2020). Kesenjangan ini seringkali disebabkan oleh kurangnya familiaritas manajer dengan metode yang lebih kompleks atau karena metode sederhana dianggap cukup sebagai alat pendukung keputusan (Michelon, Lunkes, & Bornia, 2020). Oleh karena itu, penelitian ini akan menggunakan kombinasi dari ketiga teknik tersebut—NPV, IRR, dan *Payback Period*—untuk memberikan analisis finansial yang komprehensif, yang tidak hanya valid secara teoretis tetapi juga relevan dengan praktik bisnis yang umum terjadi.

2.2.5. Bisnis dalam Biomassa

Pengembangan sektor energi biomassa semakin bergeser dari fokus yang murni bersifat teknis dan logistik menuju pendekatan yang berpusat pada model bisnis. Sebuah tinjauan literatur sistematis menunjukkan adanya peningkatan jumlah penelitian yang mengadopsi perspektif model bisnis dalam analisis biomassa (Barth, Ulvenblad and Ulvenblad, 2023). Sejauh ini, riset di bidang ini sebagian besar terkonsentrasi pada tiga pilar utama: proposisi nilai (apa yang ditawarkan kepada pelanggan), penciptaan dan penyampaian nilai (bagaimana produk atau layanan dihasilkan dan didistribusikan), serta penangkapan nilai (bagaimana pendapatan diperoleh) (Barth, Ulvenblad and Ulvenblad, 2023). Tren ini sangat menjanjikan, karena pertumbuhan biomassa di masa depan sangat bergantung pada keberhasilan pengembangan model bisnis yang berkelanjutan dari setiap aspek—sosial, lingkungan, dan finansial (Barth, Ulvenblad and Ulvenblad, 2023).

Dari perspektif finansial, memasuki industri biomassa merupakan tantangan yang signifikan karena memerlukan biaya tinggi dan pengetahuan khusus (Yang and Hung, 2021). Meskipun demikian, sektor ini juga diuntungkan oleh adanya insentif pemerintah dan dukungan publik yang cukup besar, yang menciptakan skenario menarik bagi para wirausahawan baru (Yang and Hung,

2021). Pola investasi menunjukkan bahwa pendanaan publik relatif seimbang antara sumber domestik dan internasional. Sebaliknya, investasi swasta pada proyek energi terbarukan seperti biomassa sebagian besar berasal dari sumber domestik, yang mengindikasikan adanya "ketidakpedulian komersial internasional" di bidang ini (Yang and Hung, 2021).

2.2.6. Kerangka Kerja *Business Model Canvas* (BMC)

2.2.6.1. Definisi dan Konsep Dasar BMC

Dalam merancang strategi bisnis, diperlukan alat visual yang mampu memetakan logika perusahaan dalam menciptakan nilai. Menurut Caswito et al. (2024) yang mengutip Suharti (2015), *Business Model Canvas* (BMC) didefinisikan sebagai metode yang digunakan untuk menganalisis dan menjelaskan suatu bisnis secara efektif. Metode ini mencakup berbagai aspek krusial, mulai dari pemasaran, sumber daya manusia, keuangan, hingga kualitas produk yang ditawarkan. Penerapan BMC dalam suatu organisasi atau perusahaan bertujuan agar perusahaan dapat menentukan arah strategis yang harus diambil. Selain itu, metode ini juga berfungsi untuk membantu perusahaan mengetahui keunggulan bersaing (*competitive advantage*) yang dimiliki dalam bisnis yang sedang dijalankan (Caswito et al., 2024).

2.2.6.2. Adaptasi BMC untuk Perusahaan Energi (*Energy Enterprise Canvas*)

Meskipun kerangka kerja BMC tradisional yang dikembangkan oleh Osterwalder banyak digunakan, penerapannya pada sektor energi memerlukan penyesuaian khusus. Dobrowolski dan Sułkowski (2021) dalam penelitiannya yang berjudul "*Business Model Canvas and Energy Enterprises*" berpendapat bahwa kanvas tradisional Osterwalder tidak sepenuhnya dapat menangkap model bisnis perusahaan energi. Hal ini dikarenakan perusahaan energi, khususnya yang terkait dengan penyediaan listrik negara (seperti PLTU), beroperasi di bawah persyaratan hukum yang spesifik yang berbeda dari bisnis tradisional yang hanya berfokus pada keuntungan.

Menurut Dobrowolski dan Sułkowski (2021), perusahaan energi didefinisikan sebagai organisasi yang melayani tugas publik melalui strategi berbasis pasar. Oleh karena itu, prinsip dasar perusahaan energi tidak hanya berorientasi pada keuntungan (*profit-oriented*), tetapi juga terkait dengan misi (*mission-related impact*).

Untuk mengakomodasi karakteristik ini, Dobrowolski dan Sułkowski (2021) mengusulkan modifikasi BMC dengan menambahkan tiga blok bangunan baru yang sangat relevan untuk proyek *co-firing* biomassa, yaitu:

1. Misi (*Mission*): Blok ini menyatakan tujuan keberadaan perusahaan energi yang sering kali terkait dengan kebijakan pemerintah. Dalam konteks *co-firing*, misinya bukan sekadar menjual listrik, tetapi mendukung target bauran EBT nasional dan *Net Zero Emission*. Blok ini ditempatkan di bagian paling atas kanvas sebagai landasan utama operasional.
2. Dampak (*Impact*): Blok ini menjelaskan manfaat bagi pelanggan serta ukuran keberhasilan dan kemajuan perusahaan dalam kebijakan energi. Dampak dari proyek ini dapat berupa penurunan emisi karbon (ton CO₂) dan penciptaan ekonomi kerakyatan melalui rantai pasok biomassa.
3. Akuntabilitas (*Accountability*): Mengingat perusahaan energi dibatasi oleh kerangka hukum (seperti UU Energi), mereka memiliki kewajiban untuk bertanggung jawab atas tindakan mereka dalam perencanaan, produksi, dan penggunaan energi secara berkelanjutan. Blok ini ditempatkan setelah struktur biaya untuk memastikan bahwa operasi bisnis mematuhi regulasi lingkungan dan sosial.

2.2.6.3. Sembilan Elemen BMC dalam Rantai Pasok Biomassa.

Selain elemen tambahan di atas, sembilan elemen standar BMC tetap relevan untuk memetakan aspek komersial dari penyediaan biomassa. Berikut adalah elaborasi elemen-elemen tersebut dalam konteks penelitian ini:

1. Segmen Pelanggan (*Customer Segments*): Pihak yang menjadi target pasar. Dalam rantai pasok ini, PLTU bertindak sebagai captive market yang membutuhkan pasokan kontinu untuk base load.
2. Proposisi Nilai (*Value Propositions*): Nilai lebih yang ditawarkan. Untuk biomassa *co-firing*, nilai utamanya adalah densitas energi yang sesuai spesifikasi boiler dan kepastian pasokan (*security of supply*).
3. Saluran (*Channels*): Cara produk sampai ke pelanggan. Ini mencakup manajemen armada logistik dari titik pengumpulan limbah pertanian hingga coal yard PLTU.
4. Hubungan Pelanggan (*Customer Relationships*): Jenis interaksi dengan pelanggan. Dalam bisnis energi, hubungan ini bersifat kontraktual jangka panjang (*Long-term Service Agreement*) untuk menjamin stabilitas.
5. Arus Pendapatan (*Revenue Streams*): Sumber pemasukan kas. Terdiri dari penjualan biomassa (*bio-pellet/sawdust*) dan potensi pendapatan tambahan dari kredit karbon.
6. Sumber Daya Utama (*Key Resources*): Aset strategis yang dibutuhkan, meliputi mesin pengolahan (*pelletizer*), gudang penyimpanan, dan akses terhadap bahan baku mentah.
7. Aktivitas Kunci (*Key Activities*): Kegiatan operasional utama, yaitu pengumpulan bahan baku (*sourcing*), pemadatan (*densification*), dan distribusi logistik.
8. Mitra Kunci (*Key Partners*): Pihak eksternal yang bekerja sama. Termasuk kelompok tani, pemasok limbah kayu, dan vendor transportasi.
9. Struktur Biaya (*Cost Structure*): Komposisi biaya yang dikeluarkan. Pada bisnis biomassa, komponen dominan adalah biaya bahan baku dan biaya transportasi logistik.

2.2.7. Kerangka Regulasi dan Kebijakan Energi Baru Terbarukan

Kerangka regulasi memegang peranan krusial dalam menentukan kelayakan finansial proyek transisi energi. Dalam konteks *co-firing* biomassa pada PLTU, terdapat beberapa instrumen kebijakan utama yang mengatur mekanisme teknis, penetapan harga energi, serta insentif karbon yang berlaku di Indonesia.

2.2.7.1. Kebijakan Transisi Energi dan *Net Zero Emission* (NZE)

Komitmen Indonesia untuk mencapai *Net Zero Emission* (NZE) pada tahun 2060 atau lebih cepat telah dituangkan dalam berbagai regulasi strategis. Landasan utama percepatan ini diatur dalam Peraturan Presiden (Perpres) Nomor 112 Tahun 2022 tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik. Regulasi ini menegaskan larangan pembangunan PLTU batubara baru kecuali yang sudah masuk dalam Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) sebelum peraturan berlaku, serta memberikan mandat kepada PT PLN (Persero) untuk melakukan pensiun dini atau pengurangan emisi pada PLTU *existing* (Presiden Republik Indonesia, 2022).

Implementasi strategi tersebut diperjelas dalam Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030, yang menetapkan *co-firing* biomassa sebagai salah satu program terobosan (*green booster*) untuk meningkatkan bauran Energi Baru Terbarukan (EBT) tanpa memerlukan biaya investasi (*CAPEX*) yang besar (PLN, 2021).

2.2.7.2. Regulasi Spesifik Pemanfaatan Biomassa pada PLTU

Landasan hukum teknis pelaksanaan *co-firing* diatur secara spesifik melalui Peraturan Menteri ESDM Nomor 12 Tahun 2023 tentang Pemanfaatan Bahan Bakar Biomassa Sebagai Campuran Bahan Bakar pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap. Peraturan ini memberikan kepastian hukum bagi pelaku usaha

dalam rantai pasok biomassa dan operator pembangkit. Beberapa poin krusial dalam regulasi ini yang berdampak pada analisis finansial meliputi:

1. Kewajiban dan Target: Operator PLTU didorong untuk menyusun rencana pemanfaatan biomassa jangka panjang untuk menjamin kepastian pasokan (*security of supply*).
2. Standar Kualitas: Penetapan standar spesifikasi teknis biomassa yang dapat digunakan untuk menjaga efisiensi boiler dan peralatan pembangkit.
3. Mekanisme Pengadaan: Pengaturan skema pengadaan bahan bakar biomassa yang transparan untuk menciptakan keekonomian proyek yang wajar (Kementerian ESDM, 2023).

2.2.7.3. Kebijakan Harga Patokan Tertinggi (HPT) Biomassa

Dalam analisis finansial *co-firing*, variabel harga bahan bakar biomassa merupakan komponen paling sensitif yang memengaruhi *Levelized Cost of Electricity* (LCOE). Sesuai dengan Permen ESDM No. 12 Tahun 2023 Pasal 14, harga pembelian tenaga listrik atau harga bahan bakar biomassa ditetapkan berdasarkan kesepakatan Business to Business (B2B) dengan mengacu pada Harga Patokan Tertinggi (HPT).

Prinsip penetapan HPT bertujuan agar Biaya Pokok Penyediaan (BPP) listrik tidak mengalami kenaikan yang membebani keuangan negara. Secara teknis, harga biomassa dibatasi agar setara dengan biaya bahan bakar batubara yang digantikannya (substitusi) dengan memperhitungkan faktor koreksi nilai kalor. Formulasi matematis untuk Harga Patokan Tertinggi (HPT) biomassa diuraikan dalam Persamaan berikut:

$$HPT_{Bio} \leq H_{Batubara} \times \left(\frac{N K_{Bio}}{N K_{batubara}} \right) \times \alpha$$

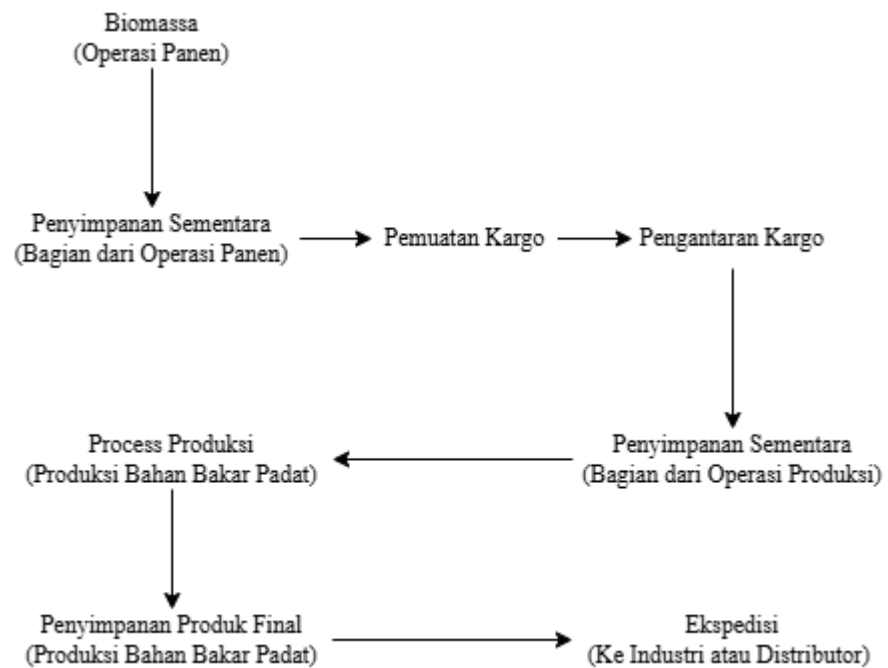
Dimana :

1. HPT_{Bio} =Harga Patokan Tertinggi Biomassa di lokasi pembangkit (Rp/ton atau USD/ton).
2. $H_{Batubara}$ =Harga Batubara acuan atau harga batubara *existing* di PLTU (Rp/ton atau USD/ton).
3. $N K_{Bio}$ =Nilai Kalor Biomassa (*Kcal/kg*)
4. $N K_{Batubara}$ =Nilai Kalor Batubara (*kcal/kg*).
5. α =Koefisien faktor koreksi (biasanya ≤ 1 untuk memperhitungkan biaya penanganan tambahan atau *handling cost*).

Persamaan ini menegaskan bahwa agar proyek *co-firing* layak secara regulasi dan finansial, harga biomassa harus kompetitif secara termal (biaya per GCal) dibandingkan batubara. Jika harga pasar biomassa melebihi HPT hasil perhitungan rumus di atas, maka proyek berpotensi meningkatkan LCOE dan menurunkan *Net Present Value* (NPV) proyek.

2.2.8. Teori Manajemen Rantai Pasok Biomassa (*Biomass Supply Chain Management*)

Keberhasilan implementasi program *co-firing* sangat bergantung pada efisiensi manajemen rantai pasok biomassa. Menurut Nunes, Causer, dan Ciolkosz (2020), tantangan utama sektor energi biomassa terletak pada karakteristik rantai pasoknya yang unik, di mana material bervolume besar namun bernilai rendah (*low value*) harus dipindahkan dari lokasi produksi yang tersebar (*dispersed*) ke fasilitas pemrosesan terpusat. Biaya logistik merupakan komponen terbesar dalam struktur biaya energi biomassa, sehingga optimasi pada setiap mata rantai menjadi krusial untuk menjaga daya saing ekonomi proyek (Nunes et al., 2020).



Gambar 2. 2 Biomass Supply Chain

Berdasarkan tinjauan literatur yang dilakukan oleh Nunes et al. (2020), rantai pasok biomassa terdiri dari tiga elemen fundamental yang saling mempengaruhi:

2.2.8.1. Pemanenan dan Pengumpulan (*Harvest and Collection*)

Proses pemanenan biomassa, baik dari sumber hutan maupun residu pertanian, menghadapi tantangan utama berupa ketersediaan musiman (*seasonal availability*). Ketersediaan biomassa sering kali dibatasi oleh periode panen tanaman, kondisi cuaca, dan siklus tanam (Nunes et al., 2020). Karakteristik musiman ini menciptakan ketidaksesuaian (*mismatch*) antara pasokan bahan baku yang fluktuatif dengan permintaan pembangkit listrik (PLTU) yang bersifat konstan sepanjang tahun (*base load*).

Untuk memitigasi risiko ini, Nunes et al. (2020) menyarankan strategi diversifikasi sumber bahan baku (*multi-feedstock supply*) atau penggunaan sistem penyimpanan jangka panjang. Selain itu, proses pra-pemrosesan awal seperti pengeringan alami (*natural drying*) dan pencacahan (*shredding*) di

lokasi panen sering dilakukan untuk mengurangi kadar air dan meningkatkan efisiensi transportasi (Nunes et al., 2020).

2.2.8.2. Transportasi (*Transportation*)

Transportasi merupakan elemen biaya yang paling sensitif dalam rantai pasok biomassa. Nunes et al. (2020) mengidentifikasi bahwa densitas biomassa yang rendah (*low bulk density*) adalah kendala utama, di mana kapasitas angkut kendaraan sering kali dibatasi oleh volume muatan, bukan berat muatan. Hal ini menyebabkan inefisiensi biaya angkut per satuan energi jika biomassa diangkut dalam bentuk mentah.

Moda transportasi jalan raya (*road transport*) menggunakan truk adalah yang paling umum digunakan karena fleksibilitasnya untuk menjangkau sumber bahan baku yang tersebar, meskipun biayanya relatif tinggi untuk jarak jauh. Oleh karena itu, strategi peningkatan densitas melalui proses densifikasi (seperti pembuatan pelet atau briket) sebelum transportasi menjadi solusi teknis yang vital untuk meningkatkan densitas energi dan menurunkan biaya logistik per kilometer (Nunes et al., 2020).

2.2.8.3. Penyimpanan (*Storage*)

Penyimpanan berfungsi sebagai penyangga (*buffer*) untuk menjembatani kesenjangan antara pasokan musiman dan permintaan kontinu. Menurut Nunes et al. (2020), keputusan terkait metode penyimpanan sangat mempengaruhi kualitas bahan bakar dan biaya total sistem.

Terdapat tiga opsi penyimpanan utama:

1. Penyimpanan Terbuka (*Open-air Storage*): Biaya investasi rendah, namun berisiko tinggi terhadap degradasi kualitas biomassa, peningkatan kadar air akibat hujan, dan potensi kerugian materi (*dry matter losses*) akibat dekomposisi biologis.

2. Penyimpanan Tertutup (*Covered Storage*): Melindungi biomassa dari cuaca dan menjaga kadar air tetap rendah, namun membutuhkan biaya investasi infrastruktur (gudang/silo) yang lebih tinggi.
3. Penyimpanan Menengah (*Intermediate Storage*): Fasilitas penyimpanan yang ditempatkan di antara lokasi panen dan pembangkit, sering dikombinasikan dengan fasilitas pemrosesan awal (densifikasi) untuk mengoptimalkan logistik rantai pasok (Nunes et al., 2020).

Pemilihan strategi penyimpanan yang tepat harus menyeimbangkan antara biaya investasi infrastruktur dengan penghematan yang diperoleh dari terjaganya nilai kalor bahan bakar (Nunes et al., 2020).

2.2.9. Analisis Strategi SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*)

2.2.9.1. Definisi dan Konsep Dasar

Analisis SWOT adalah alat fundamental yang digunakan organisasi untuk mengevaluasi posisi mereka di pasar dan merencanakan strategi dengan menganalisis lingkungan internal dan eksternal, terutama pada masa pengambilan keputusan yang krusial. Menurut Benzaghta et al. (2021) yang melakukan tinjauan literatur integratif, SWOT telah menjadi kerangka kerja dominan dalam manajemen strategis karena kemampuannya dalam memberikan interpretasi realistis mengenai kondisi bisnis saat ini dibandingkan dengan rencana masa depan.

Secara historis, konsep ini mulai berkembang pada tahun 1950-an di Harvard Business School untuk menganalisis studi kasus strategi organisasi, dan kemudian dipopulerkan kembali oleh Weihrich pada tahun 1982 sebagai alat formulasi strategi korporasi. Dalam konteks bisnis energi, SWOT digunakan untuk mengidentifikasi faktor-faktor kritis yang mempengaruhi keberhasilan implementasi teknologi baru atau ekspansi pasar.

2.2.9.2. Komponen Analisis SWOT

Analisis ini membedah empat elemen kunci yang dibagi menjadi faktor internal (dapat dikendalikan) dan faktor eksternal (di luar kendali perusahaan):

1. Kekuatan (*Strengths*)

Elemen internal organisasi yang memfasilitasi pencapaian tujuan. Dalam konteks bisnis biomassa, ini bisa berupa akses eksklusif ke bahan baku atau efisiensi teknologi.

2. Kelemahan (*Weaknesses*)

Elemen internal yang menghambat kesuksesan organisasi. Contohnya adalah keterbatasan modal atau kurangnya infrastruktur logistik.

3. Peluang (*Opportunities*)

Aspek eksternal yang dapat membantu organisasi mencapai tujuannya. Ini mencakup kesenjangan pasar yang belum terlayani atau kebijakan pemerintah yang mendukung (seperti regulasi *co-firing*).

4. Ancaman (*Threats*)

Aspek eksternal yang menjadi hambatan atau potensi penghalang bagi pencapaian tujuan, seperti fluktuasi harga komoditas global atau perubahan regulasi lingkungan.

2.2.9.3. Matriks Strategi SWOT

Tujuan utama analisis SWOT bukan hanya untuk mendaftar faktor-faktor tersebut, melainkan untuk menghasilkan opsi strategi alternatif melalui matriks interaksi. Benzaghta et al. (2021) menjelaskan empat kategori strategi yang dihasilkan dari matriks SWOT:

1. Strategi SO (*Strengths-Opportunities*): Menggunakan kekuatan internal untuk memanfaatkan peluang eksternal secara maksimal (*Maxi-Maxi Strategy*).
2. Strategi ST (*Strengths-Threats*): Menggunakan kekuatan internal untuk menghindari atau meminimalkan dampak ancaman eksternal (*Maxi-Mini Strategy*).

3. Strategi WO (*Weaknesses-Opportunities*): Memanfaatkan peluang eksternal untuk mengatasi atau memperbaiki kelemahan internal (*Mini-Maxi Strategy*).
4. Strategi WT (*Weaknesses-Threats*): Meminimalkan kelemahan internal dan menghindari ancaman eksternal. Ini sering kali merupakan strategi defensif atau *survival* (*Mini-Mini Strategy*).

Penggunaan analisis SWOT dalam penelitian ini bertujuan untuk memetakan posisi strategis bisnis penyediaan biomassa bagi PLTU 315 MW dan merumuskan strategi mitigasi risiko bisnis yang teridentifikasi dalam *Business Model Canvas*.

2.2.10. Ekonomi Sirkuler (*Circular Economy*)

2.2.10.1. Definisi dan Konsep Dasar

Ekonomi Sirkuler (*Circular Economy* atau CE) merupakan sebuah model ekonomi yang bertujuan untuk menciptakan nilai pada setiap tingkatan operasional melalui penggunaan kembali produk secara sistematis, daur ulang material, serta konservasi sumber daya alam. Islam et al. (2024) menjelaskan bahwa model ini diposisikan sebagai bentuk inovatif dari keberlanjutan yang ditujukan untuk mengatasi tantangan terkait kelimpahan sumber daya sekaligus kelangkaan material. Model CE secara fundamental sangat kontras dengan ekonomi linear yang dicirikan oleh kerangka kerja "ambil-buat-konsumsi-buang" (*take-make-consume-dispose*), yang ditandai dengan penggunaan sumber daya alam yang tinggi namun pemulihan sumber daya yang sangat terbatas.

2.2.10.2. Evolusi Prinsip: Dari 3R ke 9R

Dalam literatur mengenai ekonomi sirkuler, prinsip dasar yang awalnya dikenal luas adalah prinsip 3R, yaitu *reduce* (mengurangi input), *reuse* (menggunakan kembali), dan *recycle* (mendaur ulang material sisa). Islam et al. (2024) menyoroti bahwa untuk meningkatkan akuntabilitas korporasi dan memfasilitasi transisi yang lebih lancar, prinsip 3R tersebut telah

berevolusi menjadi kerangka kerja 9R yang lebih komprehensif. Kerangka kerja ini meliputi:

1. *Refuse* (R0): Menolak penggunaan sumber daya yang tidak perlu.
2. *Rethink* (R1): Memikirkan kembali cara penggunaan produk agar lebih efisien.
3. *Reduce* (R2): Mengurangi konsumsi sumber daya.
4. *Reuse* (R3): Menggunakan kembali produk untuk tujuan yang sama.
5. *Repair* (R4): Memperbaiki produk yang rusak agar tetap dapat berfungsi.
6. *Refurbish* (R5): Memperbarui produk lama agar sesuai dengan standar saat ini.
7. *Remanufacture* (R6): Memproduksi ulang komponen produk.
8. *Repurpose* (R7): Mengalihkan fungsi produk untuk kegunaan lain.
9. *Recycle* (R8): Mendaur ulang material terbuang menjadi produk baru.
10. *Recover* (R9): Memulihkan energi dari material sisa yang tidak dapat didaur ulang.

Posisi *Refuse* (R0) ditempatkan pada puncak progres sirkularitas, sedangkan *Recover* (R9) berada pada titik awal keluaran linear dalam proses transisinya.

2.2.10.3. Peran Biomassa dalam Ekonomi Sirkuler

Biomassa merupakan sumber daya kritis dalam upaya mencapai ekonomi sirkuler karena bertindak sebagai energi berkelanjutan yang diperoleh dari bahan organik seperti kayu, residu pertanian, dan sampah. Islam et al. (2024) menekankan bahwa pemanfaatan biomassa melalui berbagai metode, seperti pembakaran (*combustion*), gasifikasi, atau fermentasi, sangat membantu dalam mengurangi emisi gas rumah kaca dan menurunkan ketergantungan pada bahan bakar fosil. Integrasi teknik

waste-to-energy ini konsisten dengan prinsip efisiensi sumber daya dan minimisasi limbah yang diusung oleh konsep ekonomi sirkuler.

2.2.10.4. Hubungan dengan *Sustainable Development Goals* (SDGs)

Adopsi praktik ekonomi sirkuler memiliki korelasi positif yang signifikan terhadap pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan atau *Sustainable Development Goals* (SDGs). Islam et al. (2024) menyimpulkan bahwa target-target pada SDG 6 (air bersih dan sanitasi), SDG 7 (energi bersih dan terjangkau), SDG 8 (pekerjaan layak dan pertumbuhan ekonomi), SDG 12 (konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab), dan SDG 15 (kehidupan di darat) memiliki hubungan yang paling kuat dengan praktik ekonomi sirkuler.