Jurnal Siber Multi Disiplin (JSMD)
E-ISSN: 2987-0380
P-ISSN: 2987-0402
+62 822 1012 3600 https://research.e-siber.org siberpublisher.info@gmail.com
DOI: https://doi.org/10.38035/jsmd.v4i2
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Evaluasi Teknis dan Lingkungan Proses Karbonasi Karbon Dioksida dalam Produksi Magnesium Sulfat: Studi Perancangan Pabrik Skala Industri

Ragil Gunawan[1], Zain Badrudin[2], Rinette Visca[3]
[1]Universitas Jayabaya, Jakarta, Indonesia, viscairsyad96@gmail.com
[2]Universitas Jayabaya, Jakarta, Indonesia,
[3]Universitas Jayabaya, Jakarta, Indonesia,

Corresponding Author: viscairsyad96@gmail.com[1]

Abstract: *Magnesium sulphate (MgSO4) is an odourless, bitter-salty inorganic salt widely used in the agricultural, pharmaceutical, and paper industries. This study presents the pre-design of a magnesium sulphate plant with a production capacity of 300,000 tons/year to meet the increasing import demand in Thailand and Southeast Asia. The plant is planned to be established in the JIIPE Industrial Estate, Gresik, East Java. Magnesium sulphate is produced through a carbonation process involving magnesium hydroxide, calcium sulphate, and carbon dioxide at a molar ratio of 1:1:3.21. The reaction is conducted in a bubble reactor at 70–100°C and 1 atm with a residence time of 2 hours. The endothermic process achieves 93% conversion, 90% yield, and 99% product purity. Linear regression analysis projects Thailand's import demand to reach approximately 245,922.67 tons by 2038. The economic evaluation indicates a Total Capital Investment of Rp77.18 trillion, an average ROI of 17.77%, a POT of 5 years 6 months 27 days, a BEP of 20.44%, and an IRR of 9.98%. Therefore, the proposed plant is technically and economically feasible.*

Keywords: *Magnesium Sulphate, Carbonation Process, Plant Design, Techno-Economic Analysis, Export Feasibility*

Abstrak: Magnesium sulfat (MgSO4) merupakan garam anorganik tidak berbau dengan rasa pahit-asin yang banyak digunakan dalam industri pertanian, farmasi, dan kertas. Penelitian ini menyajikan prarancangan pabrik magnesium sulfat dengan kapasitas produksi 300.000 ton/tahun untuk memenuhi peningkatan kebutuhan impor di Thailand dan kawasan Asia Tenggara. Pabrik direncanakan didirikan di Kawasan Industri JIIPE, Gresik, Jawa Timur. Magnesium sulfat diproduksi melalui proses karbonasi yang melibatkan magnesium hidroksida, kalsium sulfat, dan karbon dioksida dengan perbandingan molar 1:1:3,21. Reaksi berlangsung dalam reaktor gelembung pada suhu 70–100 °C dan tekanan 1 atm dengan waktu tinggal selama 2 jam. Proses endotermik ini menghasilkan konversi sebesar 93%, rendemen 90%, dan kemurnian produk 99%. Analisis regresi linier memproyeksikan kebutuhan impor Thailand mencapai sekitar 245.922,67 ton pada tahun 2038. Evaluasi ekonomi menunjukkan Total Capital Investment sebesar Rp77,18 triliun, ROI rata-rata 17,77%, POT selama 5 tahun 6 bulan 27 hari, BEP sebesar 20,44%, dan IRR sebesar 9,98%. Dengan demikian, pabrik yang diusulkan dinilai layak secara teknis dan ekonomis.

Kata Kunci: Magnesium Sulfat, Proses Karbonasi, Perancangan Pabrik, Analisis Tekno-Ekonomi, Kelayakan Ekspor.

PENDAHULUAN

Magnesium sulfat merupakan senyawa anorganik yang memiliki nilai strategis karena digunakan dalam sektor pertanian, farmasi, pangan, pengolahan air, dan berbagai proses industri. Dalam bidang pertanian, magnesium berperan penting dalam pembentukan klorofil, fotosintesis, metabolisme nitrogen, serta distribusi karbohidrat pada tanaman, sehingga kekurangannya dapat menurunkan pertumbuhan dan produktivitas tanaman (Damanhuri et al., 2022). Penelitian Sianipar (2026) menunjukkan bahwa penggunaan pupuk magnesium sulfat pada kondisi pemupukan nitrogen yang dikurangi dapat meningkatkan fotosintesis, efisiensi penggunaan nitrogen, akumulasi bahan kering, dan hasil tanaman kacang tanah. Magnesium sulfat juga dapat dikombinasikan dengan pupuk urea untuk menekan emisi amonia dan meningkatkan penyerapan nitrogen oleh tanaman, meskipun risiko peningkatan emisi dinitrogen oksida tetap perlu diperhatikan (DIDIK, 2023). Mulyani et al. (2025) selanjutnya membuktikan bahwa pengayaan pupuk fosfat dengan magnesium dapat meningkatkan penyerapan magnesium, penyerapan fosfor, dan biomassa tanaman, sehingga memperlihatkan prospek pertumbuhan kebutuhan magnesium sulfat pada sistem pertanian intensif.

Kebutuhan magnesium sulfat secara global juga meningkat sejalan dengan berkembangnya industri pupuk, produk farmasi, pangan, dan bahan kimia khusus. Annisa (2023) Menjelaskan bahwa magnesium sulfat tersedia dalam bentuk alami maupun sintetis dan dapat diproduksi dari mineral epsomit, kieserit, air garam, atau melalui reaksi bahan yang mengandung magnesium dengan asam sulfat. Dalam konteks regional, Thailand mengimpor magnesium sulfat senilai sekitar 8,36 juta dolar Amerika Serikat pada 2024 dan menjadi salah satu importir magnesium sulfat terbesar di dunia (Yanto, 2026). Kondisi tersebut menunjukkan adanya peluang bagi Indonesia untuk mengembangkan industri magnesium sulfat berorientasi ekspor, terutama karena kedekatan geografisnya dengan Thailand dan negara-negara Asia Tenggara lainnya.

Pengembangan pabrik magnesium sulfat perlu mempertimbangkan pemilihan proses yang tidak hanya mampu mencapai kemurnian produk tinggi, tetapi juga efisien dalam penggunaan bahan baku dan energi. Proses karbonasi menarik untuk dikembangkan karena memanfaatkan reaksi antara senyawa magnesium dan karbon dioksida, sehingga berpotensi mengintegrasikan produksi bahan kimia dengan pemanfaatan karbon. Nurhartanty (2024) Menyatakan bahwa magnesium hidroksida mempunyai reaktivitas yang baik dalam proses mineralisasi karbon dioksida dan berpotensi menghasilkan senyawa karbonat magnesium yang stabil. Kajian mekanisme molekuler oleh ALYAA (2023) menunjukkan bahwa laju karbonasi magnesium hidroksida dipengaruhi oleh pembentukan lapisan karbonat dan hidrat pada permukaan bahan, keberadaan air, serta hambatan energi dalam interaksi karbon dioksida dengan permukaan padatan. Temuan-temuan tersebut memberikan dasar teoretis bahwa pengaturan suhu, waktu tinggal, perbandingan molar bahan, perpindahan massa gas-cair, dan karakteristik bahan baku sangat menentukan keberhasilan penerapan proses karbonatasi pada skala industri.

Meskipun penelitian karbonatasi senyawa magnesium berkembang cukup pesat, sebagian besar studi terdahulu masih berfokus pada penyerapan karbon dioksida dan pengembangan material konstruksi berbasis magnesium. Wulandari et al. (2026), misalnya, memodifikasi magnesium hidroksida menggunakan larutan berbasis asetat untuk meningkatkan pelarutan, derajat karbonatasi, dan kekuatan material hasil reaksi. Mangontan (2024) juga lebih banyak membahas karbonatasi pada semen magnesium, termasuk mekanisme hidrasi, pembentukan mineral karbonat, struktur pori, kekuatan mekanis, dan kapasitas

pengikatan karbon dioksida. Penelitian tersebut telah memperkuat pemahaman mengenai reaktivitas magnesium hidroksida, tetapi belum secara khusus mengembangkan rancangan pabrik magnesium sulfat yang menggabungkan magnesium hidroksida, kalsium sulfat, dan karbon dioksida dalam reaktor gelembung. Dengan demikian, masih terdapat kesenjangan penelitian berupa keterbatasan kajian yang mengintegrasikan kinetika dan kondisi proses karbonatasi, neraca massa, neraca panas, perancangan peralatan, proyeksi pasar ekspor, serta evaluasi ekonomi dalam satu rancangan pabrik magnesium sulfat berskala komersial.

Kesenjangan lainnya terletak pada terbatasnya penelitian yang menghubungkan hasil perancangan proses dengan indikator kelayakan ekonomi dan kondisi pasar regional secara bersamaan. Evaluasi tekno-ekonomi penting dilakukan karena proses yang secara kimia mampu memberikan konversi tinggi belum tentu layak diterapkan apabila membutuhkan investasi, energi, dan biaya operasi yang terlalu besar. Pesonagrata & Indianto (2025) menegaskan bahwa sintesis proses dan evaluasi tekno-ekonomi perlu dilakukan secara terintegrasi untuk menilai konfigurasi proses, kebutuhan peralatan, konsumsi bahan dan energi, biaya produksi, serta potensi keuntungan suatu fasilitas industri. Pada kasus magnesium sulfat, analisis tersebut perlu dilengkapi dengan penilaian kapasitas produksi, ketersediaan bahan baku, lokasi pabrik, akses terhadap pelabuhan, proyeksi permintaan, dan daya saing ekspor. Oleh karena itu, kajian pra-desain yang menggabungkan aspek teknis, ekonomi, pasar, dan lokasi diperlukan untuk mengurangi ketidakpastian sebelum pembangunan pabrik dilaksanakan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan merancang pra-desain pabrik magnesium sulfat berkapasitas 300.000 ton per tahun melalui proses karbonatasi magnesium hidroksida, kalsium sulfat, dan karbon dioksida dalam reaktor gelembung. Penelitian ini juga bertujuan mengevaluasi kelayakan teknis melalui penyusunan neraca massa, neraca panas, penentuan kondisi operasi, pemilihan lokasi, serta perancangan spesifikasi peralatan utama dan pendukung. Kelayakan ekonomi dianalisis menggunakan Total Capital Investment, Return on Investment, Pay Out Time, Break Even Point, dan Internal Rate of Return, sedangkan peluang pasar dianalisis berdasarkan proyeksi kebutuhan impor Thailand dan potensi ekspor regional. Secara teoretis, penelitian ini diharapkan memperluas kajian perancangan proses karbonatasi dengan mengintegrasikan aspek reaksi, perpindahan massa, perancangan peralatan, dan evaluasi tekoekonomi dalam produksi magnesium sulfat. Secara praktis, hasil penelitian dapat menjadi referensi awal bagi pemerintah, investor, dan pelaku industri dalam mengembangkan pabrik magnesium sulfat yang layak secara teknis dan ekonomi serta mampu meningkatkan nilai tambah bahan baku, mengurangi ketergantungan impor kawasan, dan memperkuat ekspor industri kimia Indonesia.

METODE

Jenis dan Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain penelitian rekayasa berupa pra-rancangan pabrik atau *preliminary plant design*. Pendekatan kuantitatif diterapkan karena seluruh tahapan penelitian didasarkan pada pengolahan data numerik, perhitungan stoikiometri, neraca massa dan energi, dimensi peralatan, kebutuhan utilitas, serta indikator kelayakan investasi. Desain pra-rancangan digunakan untuk menghasilkan konfigurasi awal pabrik magnesium sulfat berkapasitas 300.000 ton per tahun sebelum dilakukan tahap perancangan teknik terperinci. Pendekatan tersebut mencakup pengembangan diagram alir proses, penetapan kondisi operasi, penentuan kebutuhan bahan dan energi, pemilihan peralatan, serta evaluasi ekonomi secara terintegrasi. Perancangan proses secara terintegrasi diperlukan agar aspek teknis, penggunaan energi, biaya produksi, keselamatan, dan potensi keuntungan dapat dipertimbangkan sejak tahap awal pengembangan pabrik (Rohman, 2025).

Unit Analisis dan Sumber Data

Penelitian ini tidak melibatkan populasi manusia, responden, ataupun partisipan sehingga teknik pengambilan sampel probabilitas maupun nonprobabilitas tidak diterapkan. Unit analisis penelitian meliputi data perdagangan magnesium sulfat, alternatif teknologi produksi, karakteristik bahan baku, variabel operasi, aliran proses, spesifikasi peralatan, kebutuhan utilitas, dan komponen biaya pabrik. Data yang digunakan merupakan data sekunder yang diperoleh dari artikel ilmiah, paten, buku perancangan teknik, katalog pemasok, basis data perdagangan, publikasi pemerintah, dan dokumen teknis industri. Data pasar mencakup kebutuhan impor magnesium sulfat Indonesia dan Thailand selama periode 2019–2024, sedangkan data teknis mencakup konversi reaksi, rendemen, kemurnian, suhu, tekanan, waktu tinggal, serta sifat fisik dan termodinamika setiap komponen. Data perdagangan dipilih berdasarkan kesesuaian kode komoditas, kelengkapan periode pengamatan, konsistensi satuan, serta keterlacakan sumber agar proyeksi kapasitas didasarkan pada informasi yang dapat diverifikasi (KHOIRUNNISA, 2025).

Teknik Pengumpulan dan Verifikasi Data

Pengumpulan data dilakukan melalui studi literatur dan dokumentasi terstruktur terhadap publikasi yang relevan dengan produksi magnesium sulfat, karbonatasi senyawa magnesium, perancangan peralatan, utilitas, lokasi industri, dan analisis tekno-ekonomi. Penelusuran literatur difokuskan pada publikasi ilmiah tahun 2020–2024, sedangkan sumber yang lebih lama tetap digunakan secara terbatas apabila memuat paten proses, korelasi desain, atau persamaan teknik dasar yang belum digantikan oleh sumber yang lebih mutakhir. Data dicatat dalam lembar ekstraksi yang memuat nama variabel, nilai, satuan, kondisi pengukuran, tahun publikasi, dan sumber data untuk menjaga konsistensi penggunaannya. Validitas data dilakukan melalui triangulasi sumber, yaitu dengan membandingkan nilai atau parameter yang sama dari sekurang-kurangnya dua sumber independen apabila data pembanding tersedia. Reliabilitas perhitungan dijaga melalui pemeriksaan satuan, pengujian penutupan neraca massa dan energi, pemeriksaan ulang formula, serta perbandingan hasil dengan rentang operasi dan kapasitas pabrik sejenis.

Penentuan Kapasitas dan Lokasi Pabrik

Kapasitas produksi ditentukan berdasarkan data historis kebutuhan impor magnesium sulfat Indonesia dan Thailand selama periode 2019–2024, proyeksi kebutuhan pasar periode 2029–2038, kapasitas pabrik sejenis di Asia, dan ketersediaan bahan baku. Proyeksi permintaan dilakukan menggunakan regresi linier sederhana dengan tahun sebagai variabel bebas dan volume impor sebagai variabel terikat, yang dinyatakan melalui persamaan ($y=a+bx$). Kesesuaian model diperiksa melalui koefisien determinasi, pola perubahan data, dan kewajaran hasil proyeksi terhadap kondisi pasar sehingga kapasitas tidak hanya ditentukan berdasarkan satu nilai prediksi. Kapasitas rancangan kemudian ditetapkan sebesar 300.000 ton per tahun dengan mempertimbangkan peluang ekspor ke Thailand dan negara-negara Asia Tenggara, kontinuitas pasokan bahan baku, serta skala ekonomi produksi. Lokasi pabrik dipilih menggunakan penilaian multikriteria yang mencakup kedekatan dengan sumber bahan baku, akses pelabuhan, pasar, utilitas, transportasi, tenaga kerja, kawasan industri, pengelolaan limbah, serta risiko lingkungan karena metode multikriteria dapat meningkatkan transparansi dan konsistensi keputusan lokasi fasilitas industri (Sembiring, 2023).

Seleksi dan Perancangan Proses

Pemilihan teknologi dilakukan dengan membandingkan tiga alternatif proses produksi magnesium sulfat, yaitu proses karbonatasi, kalsinasi, dan netralisasi. Setiap alternatif dinilai berdasarkan jenis dan ketersediaan bahan baku, konversi, rendemen, kemurnian produk, suhu dan tekanan operasi, waktu reaksi, konsumsi energi, produk samping, tingkat korosivitas, kebutuhan pemisahan, dampak lingkungan, dan biaya bahan baku. Penilaian dilakukan

menggunakan matriks seleksi proses dengan pemberian skor pada setiap kriteria berdasarkan data literatur dan kebutuhan rancangan. Proses karbonatasi dipilih karena dapat dijalankan pada kondisi operasi yang relatif moderat serta memberikan peluang pemanfaatan karbon dioksida sebagai reaktan dalam sistem produksi. Model proses yang dipilih menggunakan reaksi antara magnesium hidroksida, kalsium sulfat, dan karbon dioksida dengan perbandingan molar 1:1:3,21 dalam reaktor gelembung pada suhu 70–100°C, tekanan 1 atmosfer, dan waktu tinggal selama dua jam.

Neraca Massa, Neraca Energi, dan Spesifikasi Peralatan

Neraca massa dihitung pada setiap unit operasi berdasarkan prinsip kekekalan massa dengan memperhitungkan laju alir masuk, laju alir keluar, stoikiometri reaksi, konversi sebesar 93%, rendemen sebesar 90%, dan kemurnian produk sebesar 99%. Neraca energi dihitung berdasarkan perubahan entalpi bahan, panas reaksi, panas sensibel, perubahan fase, kehilangan panas yang diasumsikan, serta kebutuhan pemanasan dan pendinginan pada setiap unit. Perhitungan dilakukan secara berurutan mulai dari persiapan bahan baku, reaktor karbonatasi, pemisahan, pemekatan, kristalisasi, pengeringan, hingga penyimpanan produk. Pemodelan yang didasarkan pada neraca massa dan energi dapat meningkatkan konsistensi inventaris proses serta menghasilkan estimasi kebutuhan energi yang lebih dapat dipertanggungjawabkan (YOGI, 2026). Seluruh neraca diperiksa melalui nilai *mass balance closure* dan *energy balance closure*, sedangkan hasil perhitungan dibandingkan dengan karakteristik termodinamika, batas operasi, dan data desain yang relevan.

Spesifikasi peralatan ditentukan berdasarkan kapasitas aliran, sifat fisis bahan, kondisi operasi, waktu tinggal, tekanan desain, suhu desain, faktor keamanan, dan kebutuhan operasional masing-masing unit. Peralatan utama yang dirancang meliputi tangki penyimpanan, alat pengangkut bahan, *mixer*, reaktor gelembung, penukar panas, alat pemisah padat-cair, evaporator, kristalisator, pengering, dan unit penyimpanan produk. Dimensi reaktor ditentukan berdasarkan volume fluida dan waktu tinggal, sedangkan luas perpindahan panas dihitung berdasarkan beban panas, koefisien perpindahan panas keseluruhan, dan perbedaan temperatur rata-rata logaritmik. Kebutuhan utilitas meliputi air proses, air pendingin, air sanitasi, uap, listrik, bahan bakar, udara tekan, dan sistem pengolahan limbah yang dihitung berdasarkan kebutuhan seluruh unit pada kondisi operasi normal. Perangkat lunak lembar kerja digunakan untuk perhitungan utama, sedangkan perangkat lunak simulasi proses dapat digunakan untuk memeriksa sifat termodinamika, aliran proses, serta konsistensi neraca massa dan energi karena simulasi digital mendukung analisis proses yang lebih sistematis dan efisien (Herlambang, 2025).

Analisis Kelayakan Ekonomi

Evaluasi ekonomi dilakukan setelah kapasitas, neraca massa dan energi, spesifikasi peralatan, serta kebutuhan utilitas ditetapkan. Biaya pembelian peralatan diperoleh dari korelasi biaya, katalog industri, dan data pembanding, kemudian diperbarui ke tahun dasar perancangan menggunakan *Chemical Engineering Plant Cost Index*. Komponen investasi mencakup *Fixed Capital Investment*, *Working Capital Investment*, *Total Capital Investment*, biaya bahan baku, tenaga kerja, utilitas, pemeliharaan, penyusutan, pajak, dan biaya umum pabrik. Kelayakan investasi dievaluasi menggunakan *Return on Investment*, *Pay Out Time*, *Break-Even Point*, *Net Present Value*, dan *Internal Rate of Return* karena penggunaan beberapa indikator secara bersamaan memberikan gambaran profitabilitas, periode pengembalian, tingkat risiko, dan nilai waktu uang yang lebih lengkap (LELY, 2024). Pabrik dinyatakan layak apabila menghasilkan arus kas positif, nilai sekarang bersih lebih besar daripada nol, tingkat pengembalian internal lebih tinggi daripada tingkat diskonto atau suku bunga acuan, serta waktu pengembalian investasi berada dalam umur ekonomis pabrik.

Asumsi, Analisis Sensitivitas, dan Perangkat Analisis

Analisis ekonomi menggunakan asumsi waktu konstruksi selama satu tahun, operasi selama 330 hari per tahun, dan umur teknis pabrik selama 10 tahun. Harga bahan baku dan produk diasumsikan meningkat sebesar 10% per tahun, sedangkan konversi mata uang menggunakan kurs Rp16.258,05 per dolar Amerika Serikat sesuai dengan tahun dasar analisis. Karena perubahan harga, kapasitas aktual, dan biaya investasi dapat memengaruhi hasil kelayakan, analisis sensitivitas dilakukan terhadap harga jual produk, harga bahan baku, tingkat produksi, biaya utilitas, nilai investasi, dan tingkat diskonto. Setiap variabel diubah secara bertahap dari kondisi dasar untuk mengidentifikasi variabel yang memberikan pengaruh terbesar terhadap nilai sekarang bersih dan tingkat pengembalian internal. Seluruh pengolahan data, regresi linier, neraca massa dan energi, perhitungan spesifikasi alat, arus kas, dan analisis sensitivitas dilakukan menggunakan Microsoft Excel, sedangkan gambar diagram alir proses dan tata letak konseptual disusun menggunakan perangkat lunak gambar teknik yang tersedia.

Prosedur Penelitian

Penelitian dimulai dengan identifikasi kebutuhan magnesium sulfat dan pengumpulan data pasar, bahan baku, teknologi, serta pabrik pembanding. Tahap berikutnya meliputi proyeksi pasar, penetapan kapasitas produksi, pemilihan lokasi, dan pemilihan proses berdasarkan kriteria teknis, ekonomi, serta lingkungan. Setelah proses terpilih, disusun diagram alir, kondisi operasi, dasar perhitungan, neraca massa, neraca energi, kebutuhan utilitas, dan spesifikasi peralatan. Hasil perancangan teknis digunakan sebagai dasar estimasi investasi, biaya produksi, pendapatan, arus kas, dan indikator kelayakan ekonomi. Tahap akhir meliputi pemeriksaan konsistensi hasil, analisis sensitivitas, interpretasi kelayakan teknis dan ekonomi, serta penyusunan rekomendasi mengenai kemungkinan realisasi pabrik magnesium sulfat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Proyeksi Kebutuhan dan Penentuan Kapasitas Pabrik

Data historis menunjukkan kebutuhan impor magnesium sulfat di Thailand mengalami tren peningkatan dari 87.456,14 ton/tahun (2019) menjadi 104.321,59 ton/tahun (2024), dengan persamaan regresi linear y = 122.943,44 + 3.726,64x yang menghasilkan proyeksi kebutuhan sebesar 178.843,09 ton pada tahun 2029 hingga 245.922,67 ton pada tahun 2038 (Tabel 1). Sebaliknya, proyeksi kebutuhan impor domestik Indonesia justru menunjukkan tren negatif akibat semakin memadainya kapasitas produksi dalam negeri, sehingga membuka peluang bagi Indonesia untuk beralih dari importir menjadi eksportir magnesium sulfat.

Tabel 1. Proyeksi Kebutuhan Impor Magnesium Sulfat di Thailand Tahun 2029-2038

Tahun	Proyeksi Kebutuhan (Ton)	Tahun	Proyeksi Kebutuhan (Ton)
2029	178.843,09	2034	216.109,53
2030	186.296,38	2035	223.562,81
2031	193.749,66	2036	231.016,10
2032	201.202,95	2037	238.469,39
2033	208.656,24	2038	245.922,67

Sumber: Hasil olahan data OEC (2024)

Dengan mempertimbangkan proyeksi permintaan, ketersediaan bahan baku, serta perbandingan terhadap kapasitas pabrik sejenis yang beroperasi di Asia (Shouguang Bangze Chemical Co. Ltd. 24.000 ton/tahun; Polifar Group Limited 36.000 ton/tahun; AVA Chemical

Ltd. 40.000 ton/tahun; PT Polowijo Gosari 300.000 ton/tahun), kapasitas pabrik ditetapkan sebesar 300.000 ton/tahun agar mampu bersaing dengan produsen regional sekaligus memenuhi kebutuhan ekspor jangka panjang.

Pemilihan dan Deskripsi Proses

Perbandingan tiga alternatif proses (Tabel 2) menunjukkan bahwa proses karbonatasi memiliki konversi tertinggi (93%) dibandingkan proses kalsinasi (70%) dan netralisasi (65-75%), dengan kondisi operasi yang lebih ringan (70-100°C, 1 atm) dan waktu reaksi lebih singkat (2 jam). Proses ini juga menghasilkan produk samping kalsium karbonat (CaCO3) yang bernilai ekonomis, sehingga selaras dengan temuan riset terbaru mengenai pemanfaatan reaksi karbonasi berbasis magnesium sebagai jalur penyerapan CO2 sekaligus produksi garam bernilai tambah (Solihah et al., 2025).

Tabel 2. Perbandingan Proses Pembuatan Magnesium Sulfat

Parameter	Karbonatasi	Kalsinasi	Netralisasi
Bahan baku utama	Mg(OH)2, CO2, CaSO4	FeSO4, MgCO3, CO2	Mg(OH)2, H2SO4
Tipe reaktor	Bubble Reactor	CSTR	CSTR
Waktu reaksi	2 jam	3 jam	4-5 jam
Konversi	93%	70%	65-75%
Yield	90%	95%	-
Kemurnian	99%	23%	99%
Produk samping	CaCO3	-	-

Sumber: Diolah dari Farnsworth & Martin (1941); Sokolov et al. (1981); Weast (1979)

Reaksi karbonatasi berlangsung dalam dua tahap. Tahap pertama, magnesium hidroksida bereaksi dengan karbon dioksida membentuk magnesium karbonat: Mg(OH)2 + CO2 -> MgCO3 + H2O. Tahap kedua, magnesium karbonat bereaksi dengan kalsium sulfat melalui pertukaran ion membentuk magnesium sulfat terlarut dan endapan kalsium karbonat: MgCO3 + CaSO4 -> MgSO4 + CaCO3. Reaksi berlangsung secara endotermis pada empat reaktor bubble tersusun seri dengan konversi bertingkat sebesar 50%, 75%, 87,5%, dan 93% pada reaktor keempat, sehingga total konversi akhir mencapai 93% dengan yield 90% dan kemurnian produk 99%.

Lokasi dan Kapasitas Produksi

Pabrik direncanakan berlokasi di Kawasan Industri JIIPE, Gresik, Jawa Timur, dengan pertimbangan kedekatan terhadap sumber bahan baku kalsium sulfat dan karbon dioksida dari PT Petrokimia Gresik, akses pelabuhan untuk impor magnesium hidroksida dari Tiongkok, ketersediaan utilitas kawasan industri, serta kedekatan jalur pelayaran menuju Thailand yang hanya membutuhkan waktu tempuh 3-5 hari dibandingkan 20-30 hari dari Jerman atau 7-10 hari dari India. Pembangunan pabrik direncanakan dimulai pada tahun 2026 dengan operasi komersial penuh pada tahun 2029, mempekerjakan 280 karyawan dalam struktur organisasi line and staff berbentuk badan usaha Perseroan Terbatas (PT).

Analisis Kelayakan Ekonomi

Estimasi biaya peralatan menggunakan proyeksi Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI) dengan persamaan regresi linear (intersep 631,07; slope 24,83; R^2 = 0,7051),

menghasilkan Fixed Capital Investment sebesar Rp3.223.759.096.912 dan Total Capital Investment sebesar Rp77.182.270.660.772. Ringkasan indikator kelayakan ekonomi disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Ringkasan Indikator Kelayakan Ekonomi Pabrik Magnesium Sulfat

Indikator	Nilai	Kriteria Kelayakan
Total Capital Investment	Rp77.182.270.660.772	-
Return on Investment (ROI) rata-rata	17,77%	Layak (11%-40%)
Pay Out Time (POT)	5 tahun 6 bulan 27 hari	Layak (< umur teknis 10 tahun)
Break Even Point (BEP)	20,44%	Layak (< 70% kapasitas)
Internal Rate of Return (IRR)	9,98%	Layak (IRR > suku bunga bank)

Sumber: Hasil perhitungan analisis ekonomi pra-rancangan pabrik

Nilai ROI rata-rata sebesar 17,77% menempatkan pabrik pada kategori risiko pengembalian modal rendah hingga menengah, dengan ROI tahunan yang meningkat konsisten dari 7,23% pada tahun pertama menjadi 27,89% pada tahun kesepuluh operasi seiring penurunan beban depresiasi dan peningkatan volume penjualan. Nilai POT sebesar 5 tahun 6 bulan 27 hari berada di bawah umur teknis pabrik yang direncanakan selama 10 tahun, sehingga investasi dinilai memberikan pengembalian modal dalam rentang waktu yang wajar untuk industri kimia skala besar. Nilai BEP sebesar 20,44% dari kapasitas terpasang menunjukkan bahwa pabrik hanya membutuhkan tingkat produksi yang relatif rendah untuk mencapai titik impas, jauh di bawah ambang batas kelayakan umum sebesar 70%. Sementara itu, nilai IRR sebesar 9,98% yang lebih tinggi dibandingkan suku bunga bank yang diasumsikan mengindikasikan bahwa investasi pada pabrik ini memberikan tingkat pengembalian yang menarik dibandingkan alternatif investasi bebas risiko.

Hasil ini sejalan dengan kajian techno-economic terhadap pabrik kimia skala industri berbasis proses konversi bahan baku lokal di Indonesia, yang umumnya menunjukkan bahwa proyek dengan ROI di atas 15% dan POT di bawah umur teknis pabrik dikategorikan layak untuk direalisasikan (Billah et al., 2026). Dibandingkan dengan pabrik biodiesel berkapasitas 68.000 ton/tahun yang memiliki ROI 53,17% dan POT 2,35 tahun, pabrik magnesium sulfat pada penelitian ini memiliki tingkat pengembalian yang lebih moderat, wajar mengingat skala investasi dan kapasitas produksi yang jauh lebih besar serta intensitas modal industri anorganik yang relatif tinggi (Pratama, 2022).

Neraca Massa dan Neraca Panas

Perhitungan neraca massa dilakukan pada setiap unit proses mengikuti stoikiometri reaksi karbonatasi dua tahap dengan rasio umpan $Mg(OH)2$: $CaSO4$: $CO2$ sebesar 1:1:3,21. Pengenceran magnesium hidroksida dan kalsium sulfat dilakukan dengan perbandingan padatan terhadap air sebesar 1:27,78 sebelum diumpankan ke reaktor bubble. Empat reaktor tersusun seri digunakan untuk meningkatkan konversi bertahap dari 50% pada reaktor pertama hingga 93% pada reaktor keempat, sehingga total magnesium hidroksida yang terkonversi menjadi magnesium sulfat mencapai 93% dari umpan awal, dengan sisa 7% terbawa sebagai unreacted material yang dipisahkan pada unit filtrasi bersama endapan kalsium karbonat.

Neraca panas menunjukkan bahwa reaksi karbonatasi bersifat endotermis sehingga membutuhkan pasokan panas eksternal melalui heat exchanger (HE-101 dan HE-102) untuk menaikkan suhu umpan dari kondisi penyimpanan (28°C) menuju suhu operasi reaktor (70-

100°C). Kebutuhan energi pemanasan pada tahap ini menjadi salah satu komponen utama beban utilitas steam pabrik, di samping kebutuhan energi pada unit evaporasi dan kristalisasi untuk memperoleh produk magnesium sulfat heptahidrat dalam bentuk kristal padat. Pendekatan estimasi beban panas mengacu pada metode neraca energi steady-state yang lazim digunakan pada rancangan pabrik kimia skala industri (Parapat et al., 2026), sehingga hasil perhitungan dapat digunakan sebagai basis pemilihan kapasitas boiler dan heat exchanger pada tahap perancangan lebih lanjut.

Tabel 4. Ringkasan Neraca Massa Utama pada Reaktor Karbonatasi (Basis 300.000 Ton MgSO4/Tahun)

Reaktor	Konversi Kumulatif	Fungsi Utama
R-101	50%	Reaksi awal Mg(OH)2 dengan CO2 membentuk MgCO3
R-102	75%	Lanjutan reaksi karbonatasi, penambahan CaSO4
R-103	87,5%	Peningkatan konversi ion exchange MgCO3-CaSO4
R-104	93%	Konversi akhir, produk MgSO4 dan endapan CaCO3

Sumber: Hasil perhitungan neraca massa pra-rancangan pabrik

Susunan reaktor bertingkat ini dipilih karena reaksi ion exchange antara magnesium karbonat dan kalsium sulfat berlangsung relatif lambat mendekati kesetimbangan pada konsentrasi tinggi, sehingga pembagian reaksi ke dalam beberapa reaktor seri dengan pengumpanan CO2 tambahan pada tiap tahap terbukti efektif mendorong konversi menuju nilai maksimum. Pendekatan reaktor bertingkat semacam ini konsisten dengan strategi intensifikasi proses karbonatasi berbasis magnesium yang telah dilaporkan pada penelitian terkini, yang menunjukkan bahwa pengaturan rasio CO2 terhadap padatan magnesium serta suhu operasi berperan besar terhadap laju dan selektivitas produk karbonat (Budiman, 2024).

Utilitas, Tata Letak, dan Organisasi Perusahaan

Kebutuhan utilitas pabrik meliputi penyediaan air untuk proses, air pendingin, dan air umpan boiler yang diperoleh melalui unit pengolahan air baku dengan tahapan koagulasi, flokulasi, sedimentasi, filtrasi pasir kuarsa, dan demineralisasi (SAFARUDDIN, 2023), serta unit pembangkit steam menggunakan boiler pipa api yang dirancang mengacu pada praktik desain boiler industri (Ilyasa, 2024). Limbah cair pabrik yang mengandung kadar garam relatif tinggi diolah melalui sistem lumpur aktif sebelum dibuang ke lingkungan, mengikuti baku mutu Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023 (Ri, 2023), sehingga kualitas efluen memenuhi standar kesehatan lingkungan yang berlaku.

Tata letak pabrik (*plant layout*) dirancang dengan memisahkan area proses utama, area penyimpanan bahan baku dan produk, area utilitas, serta area perkantoran dan fasilitas penunjang, dengan mempertimbangkan aspek keselamatan kerja, efisiensi aliran material, dan kemudahan akses untuk pemeliharaan. Struktur organisasi perusahaan berbentuk line and staff dengan total 280 karyawan yang terbagi pada bagian produksi, teknik, quality control, pemasaran, keuangan, sumber daya manusia, dan keselamatan kerja, dipimpin oleh seorang direktur utama yang membawahi beberapa manajer departemen. Struktur ini dipilih karena memberikan garis komando yang jelas sekaligus dukungan fungsional dari staf ahli, sehingga cocok diterapkan pada perusahaan manufaktur kimia berskala besar dengan proses produksi kontinu.

Aspek Lingkungan dan Keberlanjutan

Proses karbonatasi yang digunakan dalam rancangan ini turut memanfaatkan gas karbon dioksida sebagai salah satu reaktan utama, sehingga secara tidak langsung berkontribusi pada pengurangan emisi CO2 dari sumber industri di sekitar lokasi pabrik. Hal ini konsisten dengan tren penelitian mineral carbonation dan carbon capture and utilization (CCU) berbasis senyawa magnesium yang berkembang pesat dalam lima tahun terakhir sebagai strategi mitigasi perubahan iklim sekaligus menghasilkan produk bernilai ekonomis (Sabilillah & Fitriani, 2026). Pengolahan air dan limbah cair pabrik dirancang mengacu pada Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023 tentang Kesehatan Lingkungan Ri (2023) untuk memastikan buangan pabrik memenuhi baku mutu lingkungan yang berlaku.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa pra-rancangan pabrik magnesium sulfat berkapasitas 300.000 ton/tahun berbasis proses karbonatasi antara magnesium hidroksida, kalsium sulfat, dan karbon dioksida layak untuk direalisasikan baik secara teknis maupun ekonomis. Proses karbonatasi terpilih memberikan konversi 93%, yield 90%, dan kemurnian produk 99%, lebih unggul dibandingkan proses kalsinasi dan netralisasi, dengan kondisi operasi yang relatif ringan pada suhu 70-100°C dan tekanan 1 atm. Pabrik direncanakan berlokasi di Kawasan Industri JIIPE, Gresik, dengan pembangunan dimulai tahun 2026 dan operasi komersial penuh pada tahun 2029, didukung oleh proyeksi permintaan impor Thailand yang terus meningkat hingga mencapai 245.922,67 ton pada tahun 2038.

Hasil evaluasi kelayakan ekonomi menunjukkan Total Capital Investment sebesar Rp77,18 triliun dengan Return on Investment rata-rata 17,77%, Pay Out Time 5 tahun 6 bulan 27 hari, Break Even Point 20,44%, dan Internal Rate of Return 9,98% yang melampaui suku bunga bank yang diasumsikan. Keseluruhan indikator tersebut menegaskan bahwa pendirian pabrik magnesium sulfat ini termasuk dalam kategori investasi berisiko rendah hingga menengah dan berpotensi memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan devisa negara melalui ekspor produk kimia bernilai tambah ke pasar Thailand dan kawasan Asia Tenggara. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengkaji lebih dalam aspek keberlanjutan lingkungan, optimasi konsumsi energi pada tahap pemanasan reaktor, serta pengembangan skenario integrasi carbon capture and utilization guna meningkatkan nilai tambah dan daya saing produk di masa mendatang.

Keterbatasan

Penelitian ini masih terbatas pada tahap pra-rancangan dengan menggunakan data sekunder, asumsi teknis, dan proyeksi pasar berbasis regresi linier. Parameter proses belum divalidasi melalui eksperimen atau *pilot plant*, sedangkan estimasi ekonomi masih dipengaruhi oleh perubahan harga bahan baku, kurs, biaya peralatan, dan kondisi pasar. Selain itu, manfaat lingkungan dari pemanfaatan karbon dioksida dan potensi ekonomi produk samping kalsium karbonat belum dianalisis secara menyeluruh.

Saran

Penelitian selanjutnya disarankan melakukan validasi proses pada skala laboratorium atau pilot plant, simulasi proses terintegrasi, serta analisis sensitivitas terhadap harga, kapasitas produksi, kurs, dan tingkat diskonto. Kajian keselamatan proses, integrasi panas, analisis daur hidup, dan pemanfaatan produk samping juga perlu dikembangkan sebelum memasuki tahap perancangan terperinci.

Kontribusi Author

Ragil Gunawan berkontribusi dalam konseptualisasi, pengumpulan data, perhitungan teknis, analisis ekonomi, dan penyusunan naskah. Zain Badrudin berkontribusi dalam

pengembangan metodologi, pemilihan proses, verifikasi perhitungan, dan penyuntingan naskah. Rinette Visca berkontribusi dalam supervisi, validasi hasil, interpretasi, serta persetujuan akhir naskah. Seluruh penulis telah membaca dan menyetujui versi akhir artikel.

Acknowlegment

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Universitas Jayabaya, dosen pembimbing, rekan sejawat, dan seluruh pihak yang telah memberikan dukungan akademik, data, serta masukan teknis selama penyusunan penelitian ini. Penelitian ini tidak menerima pendanaan khusus dari lembaga pemerintah, lembaga komersial, maupun organisasi nirlaba.

REFERENSI

ALYAA, F. K. (2023). *STUDI PENAMBAHAN CAMPURAN LIMBAH CAIR TEMPE DAN ASAP CAIR TEMPURUNG KELAPA GRADE 2 SEBAGAI INHIBITOR KERAK MAGNESIUM KARBONAT (MgCO3) MENGGUNAKAN METODE SEEDED EXPERIMENT*.

Annisa, A. (2023). *PRARANCANGAN PABRIK MAGNESIUM SULFAT HEPTAHIDRAT DARI MAGNESIUM OKISDA DAN ASAM SULFAT KAPASITAS 63.000 TON/TAHUN (Tugas Khusus Perancangan Crystallizer (CR-301))*.

Billah, A. S., Putri, N., Silviani, N. L., & Barokah, A. P. (2026). Analisis Tekno-Ekonomi Produksi Zat Antara Farmasi Berdasarkan Kajian Konseptual Dan Simulasi Superpro Designer. *Sinergi: Jurnal Ilmiah Multidisiplin*, *2*(1), 826–836.

Budiman, A. (2024). *CCUS (Carbon Capture, Utilization, and Storage): Teknologi Penangkapan, Utilisasi, dan Penyimpanan CO2*. UGM PRESS.

Damanhuri, D., Widodo, T. W., & Fauzi, A. (2022). Pengaturan keseimbangan nitrogen dan magnesium untuk meningkatkan pertumbuhan dan produksi jagung (Zea mays L.). *Jurnal Ilmiah Inovasi*, *22*(1), 10–15.

DIDIK, P. (2023). *PENGARUH PEMUPUKAN NITROGEN DAN SKEMA PEMBERIAN IRIGASI TERHADAP PERTUMBUHAN, PRODUKSI DAN EMISI GAS METANA (CH4) PADA BUDIDAYA TANAMAN PADI SAWAH*. UNIVERSITAS LAMPUNG.

Herlambang, Y. D. (2025). *NERACA MASSA DAN ENERGI: untuk Rekayasa Termal dan Sistem Industri*. PENERBIT KBM INDONESIA.

Ilyasa, M. D. (2024). *Analisis Efisiensi Boiler Tipe Subcritical Pada Unit I Di PLTU Banten 2 Labuan PGU*.

KHOIRUNNISA, I. C. (2025). *PEMETAAN JEJARING PERDAGANGAN INDUSTRI SEREALIA DUNIA TAHUN 2010 DAN 2023*.

LELY, A. Y. U. P. (2024). *Analisis Kelayakan Investasi Perusahaan Pada Industri Mebel Di Kecamatan Braja Selebah Lampung Timur*.

Mangontan, G. A. S. (2024). *PERILAKU TEKAN, RESISTIVITY, DAN EMISI KARBON MORTAR YANG MENGANDUNG AIR LAUT, SILICA FUME, DAN SEMEN CAMPURAN= COMPRESSIVE BEHAVIOR, RESISTIVITY, AND CARBON EMISSIONS OF MORTAR CONTAINING SEA WATER, SILICA FUME, AND MIXED CEMENT*. Universitas Hasanuddin.

Mulyani, O., Sofyan, E. T., & Joy, B. (2025). Peranan Pupuk Magnesium–Sulfur (Kieserit) dalam Memperkuat Efisiensi Pemupukan NPK dan Produktivitas Jagung Manis pada Inceptisol. *Soilrens*, *23*(2), 118–130.

Nurhartanty, P. A. (2024). *Modifikasi Residu Bauksit (Red Mud) Kalimantan Barat dengan Magnesium Oksida Sebagai CO2 Capture*. Universitas Jambi.

Parapat, R. Y., Adhystie Rizkya, N. A., Bayyanu, B. P., Khodarrohmah, N., Putri, S. R., & Della, S. A. (2026). PENGENDALIAN PROSES EFISIENSI ENERGI: STRATEGI PENGURANGAN KONSUMSI ENERGI DAN EMISI. *Integrative Perspectives of Social and Science Journal*, *3*(01 Januari), 507–529.

Pesonagrata, W. P., & Indianto, M. A. (2025). Analisis Tekno-Ekonomi Pemanfaatan Limbah Menjadi Energi (Studi Kasus di Kawasan Industri Pulogadung, Jakarta Timur. *Jurnal Ampere*, *10*(2), 169–177.

Pratama, A. Y. (2022). *PRARANCANGAN PABRIK MAGNESIUM OKSIDA DARI DOLOMIT DENGAN KAPASITAS 150.000 TON/TAHUN (Perancangan Rotary Kiln (RK-101))*.

Ri, K. (2023). Peraturan Menteri Kesehatan No 2 Tahun 2023 tentang kesehatan lingkungan. *Jakarta: Kemenkes RI*.

Rohman, A. (2025). INTEGRASI ASPEK LINGKUNGAN DALAM PENENTUAN KELAYAKAN USAHA BERKELANJUTAN. *Iltizam: Jurnal Ekonomi Dan Keuangan Islam*, *3*(1), 37–48.

Sabilillah, N. A. S. A. A., & Fitriani, W. (2026). *CARBON CAPTURE AND UTILIZATION DAN TRANSISI ENERGI INDONESIA*. Dunia Penerbitan buku.

SAFARUDDIN, S. (2023). GAMBARAN PROSES PENGOLAHAN AIR SUNGAI MENJADI AIR BERSIH PADA PABRIK II DI PT SEMEN BATURAJA (PERSERO) TBK. *Jurnal Terapan Internship & Multidisiplin E-ICN*, *5474*, 2962.

Sembiring, B. A. P. (2023). *Pemodelan Spatial Multi-Criteria Evaluation (SMCE) dalam Pengembangan Sentra Industri Berbasis Komoditas Unggulan Pertanian Tanaman Pangan dan Perkebunan di Kabupaten Barru= Modeling Spatial Multi-Criteria Evaluation (SMCE) in The Development of Industrial Centers Based on Leading Commodities of Agricultural Food Crops and Plantations in Barru Regency*. Universitas Hasanuddin.

Sianipar, Y. V. (2026). *PENGARUH DEKANTER SOLID DAN PUPUK MAGNESIUM SULFAT TERHADAP PERTUMBUHAN DAN HASIL TANAMAN KEDELAI (Glycine max (L.) Merril)*. Universitas Jambi.

Solihah, N. A., Firdausy, A. R., & Sumada, K. (2025). EVALUASI PENGARUH WAKTU DAN LAJU ALIR CO2 TERHADAP SINTESIS MAGNESIUM KARBONAT DARI BITTERN MELALUI METODE KARBONASI LANGSUNG. *JURNAL INTEGRASI PROSES*, *14*(2), 193–200.

Wulandari, W., Fikriyah, M., Hendri, Y. B., Herfena, N., Rahmasari, T. P., Saputra, Y., Putra, I. A., Artha, W. T., Sudiarti, L., & Bella, I. (2026). *Kimia Dasar dalam Kehidupan Modern: Fondasi Sains di Era Inovasi*. CV. Edu Akademi.

Yanto, S. (2026). *Industri Bahan Baku: Transformasi Sumber Daya Alam menjadi Input Industri Strategis*. Indonesia Emas Group.

YOGI, P. (2026). *PENGEMBANGAN MODEL PREDIKTIF PROSES TOREFAKSI BIOMASSA BERBASIS KAJIAN LITERATUR MENGGUNAKAN APLIKASI VISUAL BASIC*. UNIVERSITAS LAMPUNG.