



Seminar Nasional Ilmu Teknik dan Aplikasi Industri (SINTA)

Homepage: sinta.eng.unila.ac.id



Kajian Tekno Ekonomi Produksi Gliserol Karbonat dari Gliserol dan Urea

H. Rustamji ^{a,*}, Martinus ^b, S. Erfani ^c, M. Djanna ^d, A. Febrianti ^a, S. Hillary ^a (P adalah inisial nama penulis)

^a Jurusan Teknik Kimia Universitas Lampung, Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No. 1, Bandar Lampung 35145

^b Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung, Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No. 1, Bandar Lampung 35145

^c Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung, Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No. 1, Bandar Lampung 35145

^d Jurusan Teknik Lingkungan Universitas Lampung, Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No. 1, Bandar Lampung 35145

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat artikel:
Diterima 11/11/2024
Direvisi 13/01/2025
Dipublish 22/05/2025

Kata kunci:
Gliserol
Urea
Kinetika Reaksi
Perancangan Pabrik
Tekno Ekonomi

ABSTRAK

Limbah gliserol mentah dari produksi biodiesel dapat digunakan sebagai bahan baku untuk produk dengan nilai tambah seperti gliserol karbonat yang menjadi produk berkualitas di sektor medis dan kecantikan, sebagai pembawa pada baterai litium dan litium-ion, pelarut, komposisi deterjen, surfaktan, perantara kimia, polimer, dan bahan untuk membangun material eko-komposit. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menilai aspek teknis dan ekonomis dari proses produksi gliserol karbonat melalui simulasi. Simulasi dilakukan dengan perangkat lunak yang melibatkan beberapa unit operasi dan unit rekasi. Kemurnian produk gliserol karbonat tinggi sebesar 99,99% dan performa kimia yang baik dengan konversi gliserol 93,20% dan hasil gliserol karbonat sebesar 93,13% berhasil diperoleh. Nilai bersih sekarang (NPV), periode pengembalian (PP), dan tingkat pengembalian internal (IRR) adalah masing-masing 5.480.000 USD, 5,69 tahun, dan 20,9%. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa biaya bahan baku dan harga produk utama memiliki dampak signifikan terhadap NPV dan PP. Untuk meningkatkan keuntungan proses ini, harga gliserol mentah harus kurang dari 0,44 USD/kg dan harga gliserol karbonat harus lebih dari 3,15 USD/kg. Temuan ini menunjukkan bahwa penggunaan gliserol mentah sebagai produk samping dari sintesis biodiesel merupakan pilihan yang sangat baik untuk mengembangkan produk baru dengan nilai lebih tinggi, serta berkontribusi signifikan terhadap prinsip zero-waste dan ekonomi sirkular.

1. Pendahuluan

Gliserol mentah adalah produk samping yang dapat dihasilkan reaksi transesterifikasi dari lemak hewan, minyak nabati, minyak goreng bekas, dan alga dengan metanol sebagai alkohol. Produk ini menyumbang sekitar 10% dari total produksi biodiesel dan sering dibuang sebagai limbah industri. Peningkatan kapasitas produksi biodiesel telah menciptakan pasar untuk

gliserol mentah, yang berkontribusi pada penurunan harga gliserol. Gliserol mentah dapat dimurnikan dan diubah menjadi produk bernilai tambah. Untuk memastikan perkembangan jangka panjang dari *biorefinery*, gliserol mentah harus dimanfaatkan secara efektif untuk menghasilkan bahan kimia bernilai tambah yang mengurangi limbah dari proses produksi biodiesel (Zheng et al., 2008).

* Penulis korespondensi.
E-mail: heri.rustamaji@eng.unila.ac.id (Heri Rustamaji)

Gliserol mentah mengandung banyak kontaminan yang menurunkan kualitasnya. Gliserol mentah terdiri dari 30–80% gliserol dan mengandung berbagai kotoran seperti metanol, air, asam lemak bebas (FFA), dan abu. Kandungan kotoran dalam gliserol mentah tergantung pada bahan baku yang digunakan dalam reaksi kimia biodiesel. Adanya kotoran ini membatasi aplikasi industri gliserol mentah. Perlu dicatat bahwa gliserol mentah umumnya tidak dapat digunakan langsung dalam proses konversi katalitik karena kotoran dalam gliserol mentah dapat menyebabkan deaktivasi katalis. Kekurangan utama dari gliserol yang diperoleh adalah kontaminasi air setelah proses pemurnian. Ketika kadar air dalam gliserol mencapai 1,6% berat, hasil gliserol karbonat turun drastis menjadi 75,4%. Hasil ini menunjukkan bahwa katalis memiliki ketahanan tertentu terhadap air; namun, katalis akan mengalami deaktivasi jika kadar air dalam gliserol lebih tinggi. Akibatnya, pemurnian gliserol mentah umumnya diperlukan sebelum dilakukan konversi katalitik bernilai tambah dari gliserol (Chilakamarry et al., 2021; Zheng et al., 2008).

Gliserol karbonat, atau 4-hidroksimetil-1,3-dioksolan-2-on, adalah salah satu produk turunan gliserol yang menarik. Gliserol karbonat adalah cairan polar tak berwarna dengan titik nyala dan titik didih tinggi. Zat ini tidak beracun, memiliki tingkat mudah terbakar rendah, laju penguapan rendah, dan volatilitas rendah. Selain itu, jika glycerol carbonate berkualitas tinggi, ia menjadi produk berkualitas di sektor medis dan kecantikan karena dapat digunakan untuk mengurangi kerutan kulit. Selain itu, glycerol carbonate banyak digunakan sebagai pembawa pada baterai litium dan litium-ion, pelarut, komposisi deterjen, surfaktan, perantara kimia, polimer, dan bahan untuk membangun material eko-komposit (Checa et al., 2020; Jitjamnong et al., 2023).

Di antara berbagai rute sintesis glycerol carbonate, transesterifikasi adalah salah satu metode untuk menghasilkan glycerol carbonate. Namun, karena biaya dimetil karbonat kelas komersial sekitar tiga kali lipat dari metanol dan membutuhkan rasio bahan baku tinggi antara dimetil karbonat dan gliserol, beberapa peneliti menyarankan bahwa rute gliserolisis urea dan gliserol adalah reaksi yang berkelanjutan, di mana urea berfungsi sebagai sumber karboksilasi yang terjangkau, dengan hasil dan selektivitas tinggi. Metode ini menjadikannya pilihan yang ramah lingkungan dan berbiaya rendah. Proses ini tidak beracun dan ramah lingkungan. Satu-satunya produk sampingan signifikan dari jalur ini adalah amonia dalam bentuk gas, yang dapat langsung diubah menjadi urea dan produk turunan amonia lainnya (Alvarez Serafini et al., 2023; Teng et al., 2014).

Analisis teknis-ekonomi adalah metode yang digunakan untuk menilai efektivitas teknologi dan ekonomi dari simulasi proses. Tujuan dari penelitian ini

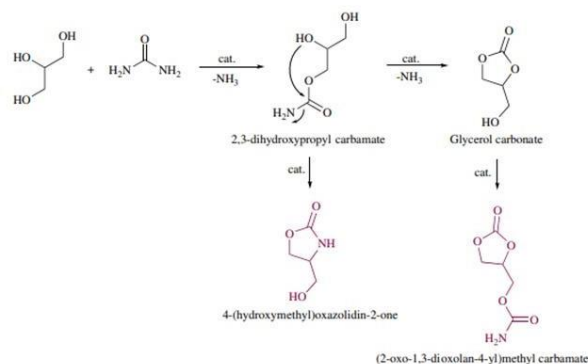
adalah untuk melakukan analisis kimia terhadap pemurnian gliserol mentah yang berasal dari produksi biodiesel dan mengembangkan produksi gliserol karbonat menggunakan perangkat lunak. Studi ini berfokus pada proses berbasis proses rekasi dan pemisahan yang melibatkan gliserolisis antara urea dan gliserol mentah. Selain itu, studi ini juga meninjau kelayakan produksi berdasarkan analisis teknis dan ekonomis.

2. Metodologi

Untuk melanjutkan analisis ekonomi, kinetika reaksi dan kesetimbangan uap-cair harus dihitung dengan tepat dalam simulasi agar peralatan dapat dirancang dengan benar. Sifat-sifat semua komponen yang terlibat dalam sistem tersedia dalam basis data simulator (Lertlukanasuk et al., 2013).

2.1. Produksi Gliserol Karbonat dari Gliserol

Sintesis gliserol karbonat dari gliserol dan urea dengan katalis yang sesuai merupakan metode produksi yang menarik. Metode ini memiliki beberapa keunggulan, yaitu bahan baku gliserol dan urea tidak beracun, murah, dan mudah diperoleh, tidak ada pelarut yang ditambahkan dalam reaksi, kondisi reaksi yang ringan, dan laju konversi gliserol yang tinggi. Hasil gliserol karbonat dengan menggunakan metode karbonilasi dengan urea memiliki sistem reaksi yang rendah, dan katalis harus digunakan untuk mendapatkan tingkat konversi gliserol yang lebih tinggi (Climent et al., 2010).

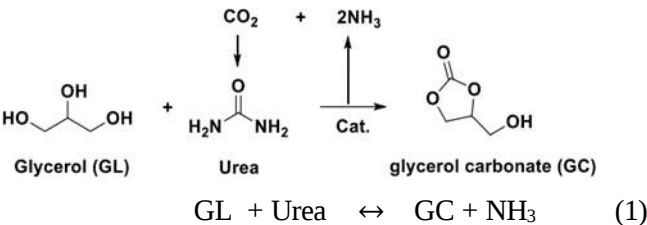


Gambar 1. Reaksi antara urea dan gliserol yang diusulkan Rubio-Marcos.

Mekanisme reaksi pada rute urea yaitu gugus hidroksil gliserol bereaksi dengan atom karbon karbonil dalam urea dibawah pengaruh katalis. Setelah gas amonia dihilangkan, akan terjadi reaksi pembentukan cincin yang menghasilkan gliserol karbonat. Namun, hilangnya air pada tahap ini dapat mengakibatkan pembentukan 4-(hydroxymethyl) oxazolidin-2-one sebagai produk samping, setelah pembentukannya, selanjutnya dapat bereaksi dengan urea menghasilkan

(2-oxo-1,3-sioxolan-4-yl) methylcarbamate. Dalam proses pembuatan gliserol karbonat reaksi yang terjadi cenderung lambat, maka dibutuhkan atau ditambahkan katalis untuk mempercepat terjadinya reaksi yang berfungsi untuk menurunkan energi aktivasi reaksi sehingga reaksi dapat berlangsung lebih cepat. Katalis yang digunakan untuk reaksi transesterifikasi cukup rumit. Namun seperti yang diketahui, katalis dapat dibagi menjadi empat kategori utama, yaitu katalis homogen, katalis heterogen, nano katalis dan biokatalis (Rizwanul Fattah et al., 2020).

Dalam proses ini, satu reaksi berurutan harus dipertimbangkan: gliserolisis urea dengan produk utama yang diinginkan adalah gliserol karbonat, dan amonia sebagai produk sampingan. Reaksi ini bersifat reversibel, dan parameter reaksi dihitung menggunakan jalur reaksi utama yang ditampilkan dalam Persamaan (1).



Dengan GL, dan GC masing-masing menyatakan gliserol dan gliserol karbonat. Kinetika reaksi digunakan dari Wang et al (2024) dengan persamaan :

$r_1 = kC_{GL}C_{urea}$ (2)

dengan A $k = A \exp(\frac{-E}{RT})$ (3)
adalah faktor pre-eksponal dari konstanta laju reaksi; E adalah energi aktif dari reaksi, dalam kJ/mol; R adalah konstanta gas ($R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$); dan T adalah suhu reaksi, dalam K.

2.2. Simulasi Proses

Simulasi proses secara lengkap dilakukan untuk menilai kelayakan komersial dari proyek pabrik . Proses ini terdiri dari tahap produksi dan pemurnian gliserol karbonat. Gliserol mentah digunakan sebagai bahan baku untuk memproduksi gliserol karbonat melalui reaksi gliserolisis. Desain proses disimulasikan menggunakan perangkat lunak Aspen Plus. Prosedur simulasi proses meliputi penentuan komposisi kimia, pemilihan unit operasi, pemilihan model termodinamika, dan perancangan kondisi input. Komponen kimia dipilih dari library basis data Aspen Plus. Model termodinamika *non random two-liquid* (NRTL) dipilih untuk desain simulasi ini untuk

menentukan koefisien aktivitas dari fasa cair (Jitjamnong et al., 2023).

Pada proses simulasi, giserol yang digunakan diasumsikan memiliki kemurnian 80% berat dengan sisa kandungan lain adalah air. Urea yang digunakan dalam bentuk larutan dengan komposisi 52% berat dalam larutan air. Katalis yang digunakan berupa ZnSO4. Proses reaksi dijalankan pada 120 °C dengan proses kontinyu di reaktor tangka alir berpengaduk. Karena proses reasksi berajalan lambat dan dibutuhkan volume reaksi yang besar, maka reaksi dijalankan dalam reaktor secara seri. Sela proses reaksi akan dihasilkan gliserol karbonat sebagai produk utama dan amonia sebagai produk samping. Ammonia dikeluarkan dari reaktor selama proses reaksi, hal ini akan mendorong reaksi bergeser ke arah produk (Wang & Ma, 2024).

Setelah proses reaksi, campuran katalis dinetralkan dan dipisahkan dengan filter. Selanjutnya campuran produk dikirim ke kolom distilasi untuk memurnikan gliserol karbonat. Kolom distilasi dioperasi pada kondisi vakum untuk menurunkan titik didih campuran. Kemurnian produk gliserol karbonat ditergetkan pada 99,9%.

2.3. Analisis Ekonomi Produksi Gliserol Karbonat

Program *Aspen Economic Evaluation* digunakan untuk mengevaluasi ekonomi dari pabrik produksi gliserol karbonat. Analisis ekonomi terdiri dari analisis biaya yang terkait dengan proses produksi gliserol karbonat sebagai produk utama dan amonia sebagai produk sampingan. Proses ini dirancang dengan kapasitas pabrik sebesar 8.000 ton/tahun dari gliserol mentah. Waktu operasi untuk pabrik produksi gliserol karbonat diperkirakan mencapai 8.000 jam per tahun, yang setara dengan 334 hari per tahun, dan 3 shift per hari, dengan

waktu evaluasi proyek selama 20 tahun (Jitjamnong et al., 2023).

Jumlah tenaga kerja operasional (N_{OL}) dapat dihitung menggunakan Persamaan (4):

$N_{OL} = (6.29 + 31.7P^2 + 0.23N_{np})^{0.5}$ (4)

di mana N_{OL} adalah jumlah operator per shift, P menyatakan jumlah total operasi unit penanganan partikel, dan (N_{np} menyatakan jumlah total operasi unit penanganan non-partikel. Metode yang digunakan untuk mengevaluasi kelayakan proyek mencakup nilai (*Net Present Value*, NPV), tingkat pengembalian internal (*Internal Rate of Return*), periode pengembalian (*Payback Periode*, PP), dan biaya produksi per unit. Analisis ekonomi suatu proyek mengukur biaya dan manfaat secara kira-kira (Aresta et al., 2009). NPV adalah konsekuensi langsung dari estimasi yang digunakan untuk menentukan arus kas masuk dan keluar dari nilai saat ini, yang mempertimbangkan aliran

pembayaran di masa depan. NPV dihitung dengan menggunakan Persamaan (5):

$$NPV = \sum_{t=0}^n R_t / (1 + i)^t \tag{5}$$

di mana R_t adalah arus kas pada periode t , i adalah tingkat diskonto, dan n adalah jumlah periode yang dianalisis. Dengan menggunakan pendekatan ini, pabrik dapat dinilai apakah menghasilkan keuntungan yang memadai selama masa operasi yang direncanakan. Analisis ini penting untuk menarik investor dan memutuskan kelayakan proyek produksi gliserol karbonat secara ekonomi (Haider et al., 2015).

Ketika berhadapan dengan arus kas jangka panjang, *pay out periode* (PP) sering digunakan. Persamaan bisa digunakan sebagai alat penyaring proyek untuk proyek-proyek berisiko tinggi pada saat-saat tertentu ketidakpastian keuangan. PP dihitung menurut Persamaan (6).

$$PP = \frac{\text{Cost in Investment}}{\text{Annual net cash flow}} \tag{6}$$

IRR ditentukan dengan menyelesaikan NPV untuk diskon yang diperlukan tingkat bunga untuk membuat NPV seluruh arus kas sama dengan nol (Jitjamnong et al., 2023). Hal ini dapat biasa meramalkan kemungkinan keuntungan selama berbagai periode waktu berdasarkan tingkat pengembalian yang diproyeksikan. IRR diperkirakan menggunakan Persamaan. (7).

$$PPV = 0 = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+IRR)^t} - C_0 \tag{7}$$

dimana C_t adalah arus kas masuk bersih selama periode t , C_0 menunjukkan total masuk awal biaya investasi, IRR menunjukkan tingkat pengembalian internal, dan t menunjukkan jumlah periode waktu.

2.3.1. Investasi Modal Total

Teknik perhitungan modul digunakan untuk memperkirakan total investasi modal (*Total Capital Investment*, TCI) yang dibutuhkan untuk pabrik produksi gliserol karbonat. TCI mengacu pada jumlah total uang yang diperlukan untuk membeli fasilitas pabrik dan manufaktur yang diperlukan untuk membangun sebuah pabrik baru. Peralatan yang diperlukan dan spesifikasinya untuk perkiraan biaya dievaluasi menggunakan hasil simulasi dari perangkat lunak Aspen Plus.

Seperti ditunjukkan dalam Persamaan (8), TCI dihitung sebagai jumlah dari dua komponen: investasi modal tetap (*Fixed Capital Investment*, FCI) dan investasi modal kerja (*working capital investment*, WCI).

$$TCI = FCI + WCI \tag{8}$$

FCI mewakili biaya untuk membangun fasilitas manufaktur yang siap pakai, dan dihitung dengan

menggabungkan total biaya langsung (*Total Direct Cost*, TDC) dan total biaya tidak langsung (*Total Indirect Cost*, TIC), seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan (9).

$$FCI = TDC + TIC \tag{9}$$

TDC mencakup biaya peralatan yang dibeli, pemasangan dan pengecatan peralatan, instrumen dan kontrol yang dipasang, instalasi pipa, sistem kelistrikan yang dipasang, bangunan, fasilitas proses dan tambahan, fasilitas layanan, perbaikan halaman, serta tanah. TIC mencakup kontingensi proyek, rekayasa dan supervisi, biaya hukum, serta biaya konstruksi dan kontraktor. Tabel 1 merangkum asumsi kunci yang digunakan untuk memperkirakan biaya TCI berdasarkan perhitungan yang dilakukan oleh Peters et al.

Tabel 1. Asumsi utama untuk memperkirakan total investasi modal

Component Cost	Percentage
Total direct cost	TDC
Purchased equipment cost	PEC
Equipment installation and painting Instrumentation and controls (installed)	25% of PEC
Piping (installed)	10% of PEC
Electrical system (installed)	10% of PEC
Buildings, process, and auxiliary	10% of PEC
Service facilities and yard improvements	40% of PEC
Land	8% of PEC
Total indirect cost	TIC
Engineering and supervision	5% of TDC
Legal expense	1% of FCI
Construction expense and constructor's free	10% of FC
Contingency charges	15% of FCI
Fixed capital investment	FCI
Working capital investment (WCI)	5% of FCI
Total capital investment	TCI

Dengan memperhitungkan semua biaya ini, analisis ekonomi dapat memberikan gambaran yang jelas mengenai kelayakan finansial dari proyek produksi gliserol karbonat, memungkinkan untuk pengambilan keputusan yang tepat dalam investasi.

2.3.2. Biaya Total Produksi

Biaya total produk (*Total Production Cost*, TPC) adalah komponen utama dalam analisis ekonomi, seperti yang diuraikan dalam Tabel 2. TPC ditentukan dengan menggabungkan biaya produksi (*Cost of Manufacturing*, COM) dan biaya umum (*General Expenses*, GE), seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan (8).

TPC = COM + GE

(8)

Biaya produksi (COM) mencakup semua pengeluaran yang terkait langsung dengan operasi produksi dari jalur produksi. Jumlah dari biaya produksi langsung, biaya tetap, dan overhead pabrik dapat digunakan untuk menghitung COM, seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan (9).

COM = Biaya Produksi Langsung + Biaya Tetap + Overhead Pabrik

(9)

Biaya produksi langsung dibagi menjadi lima kategori: bahan baku (C_{RM}), tenaga kerja operasional (C_{OL}), utilitas (C_{UT}), pemeliharaan dan perbaikan pabrik, serta

3. Hasil dan pembahasan

Proses produksi gliserol karbonat melibatkan beberapa peralatan unit operasi meliputi reaktor, alat penular panas, splitter dan kolom distilasi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Proses produksi dimulai dengan pemansan umpan gliserol mentah dan katalis untuk mencapai suhu reaksi. Reaksi dijalankan pada reaktor tangki alir berpengaduk pada temperatur konstan. Untuk mencapai konversi dan memenuhi kapasitas produksi digunakan tiga unit reaktor secara seri. Hal ini karena reaksi pembentukan gliserol tergolong lama (> 2 jam) sehingga dibutuhkan volume reaktor yang besar. Berdasarkan hasil simulasi untuk mencapai konversi 99,5% diperlukan volume reaktor total 55 m^3 . Reaktor dijalankan pada tem[eratur 120°C dan tekanan $1,1\text{ atm}$. Pada kondisi tersebut dihasilkan gas ammonia yang selanjutnya dialirkan keuar reaktor. Pengeluaran gas ammonia dari reaktor akan mendorong kesetimbangan bergeser ke arah produk, oleh karna itu konversi meningkat dan jumlah produk yang dihasilkan lebih banyak (Wang & Ma, 2024). Katalis homogen yang digunakan berupa larutan ZnSO_4 . Setelah selesai rekasi katalis dinetrakan dengan NaOH untuk membentuk $\text{Zn}(\text{OH})_2$ dan garam Na_2SO_4 . $\text{Zn}(\text{OH})_2$ dipisahkan di splitter sementara lartan Na_2SO_4 ditambakan air agar dapat larut dalam air dan dipisahkan dari gliserol karbonat dengan splitter.

pengolahan limbah. Pengeluaran ini terutama terjadi saat pabrik dioperasikan.

Tabel 2. Asumsi utama untuk memperkirakan total biaya

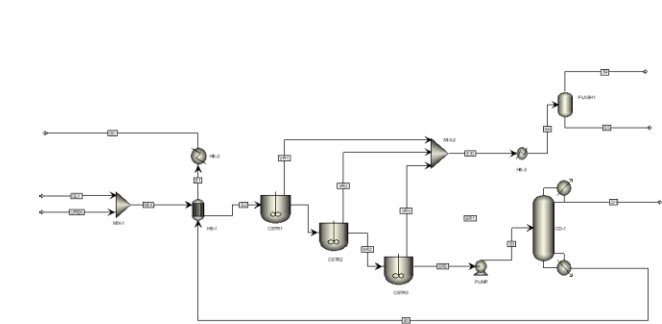
Component Cost	Percentage
Direct Production Cos	
Raw materials	CRM
Operating labor	COL
Utilities	CUT
Maintenance and repairs	2% of FCI
Operating supplies	0.5% of FCI
Fixed charges	
Local taxes	1% of FCI
Insurance	0.4% of FCI
Plant overhead	5% of TPC
Cost of manufacturing (COM)	Direct production + Fixed charges + Plant overhead
General expenses	
Administrative	2% of TPC
Distribution and marketing	2% of TPC
Research and development	5% of TPC
Total product cost	TPC

Tabel 3. Harga bahan baku dan Produk

Item	Cost	Reference
Bahan baku		
Crude glycerol	240 USD/ton	
Urea	270 USD/ton	
Produk		
Glycerol carbonate	3,500 USD/ton	
Ammonia	514 USD/ton	

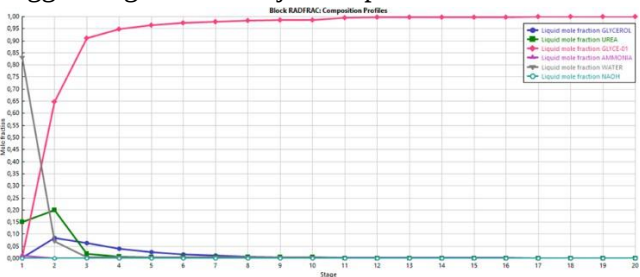
Tabel 4. Harga utilitas

Utility	Unit	Cost
Cooling water	USD/t _{on}	0,0148
EleCtricity	USD/kWh	0,06
High-pressure steam (254 ° C)	USD/ton	29,97
Low-pressure steam (160 ° C)	USD/ton	29,29



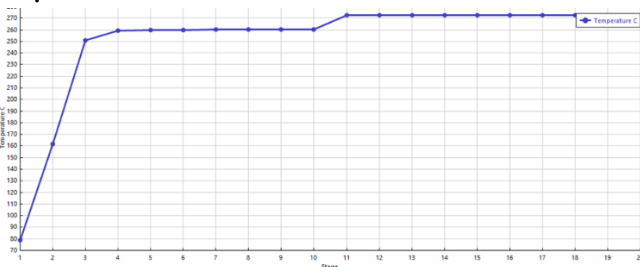
Gambar 2. Diagram Alir proses produksi gliserol karbonat dari gliserol dan urea

Produk gliserol karbonat selanjutnya dimurnikan dengan kolom distilasi biasa dengan jumlah tray teoritis sebanyak 20. Internal kolom digunakan *structure packing* BXPLUS dengan 2 seksi masing-masing di bawah tray umpan dan di atas tray umpan dan diperoleh diameter kolom. Aliran massa (masuk dan keluar) untuk pabrik produksi gliserol karbonat. Perhitunagn detail dilakukan pada kolom pemisahan DC-1. Profil komposisi kolom distilasi dilakukan untuk memvalidasi kemurnian produk gliserol karbonat pada nilai yang tinggi sebagiamna ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Profil komposisi pada kolom distilasi

Kolom distilasi sangat ditentukan oleh kondisi operasi tekanan dan temperatur. Profil temperatur di dalam kolom distilasi disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Profil temperatur pada kolom distilasi.

Perhitungan ekonomi dilakukan untuk menentukan kelayakan dari investasi ekonomi pabrik gliserol karbonat ini. Harga peralatan, harga bahan baku dan nilai parameter ekonomi disajikan pada tabel di bawah.

Tabel 6. Harga peralatan pabrik gliserol karbonat

Name	Equipment Cost [USD]	Installed Cost [USD]
HE-3	10.200	70.900
CD-1	135.400	561.900
HE-2	8.900	69.000
FLASH1	16.400	103.600
CSTR1	215.600	396.700
HE-1	8.400	58.000
CSTR2	215.600	396.700
PUMP	4.300	30.100
CSTR3	215.600	396.700

Tabel 7. Harga utiltas

Name	Fluid	Rate	Rate Units	Cost per Hour	Cost Units
Electricity		220,356	kW	17,07759	USD /h
Cooling Water	Water	0,007052	MMGa l/h	0,84624	USD /h

Tabel 8. Biaya investasi modal dan biaya produk pabrik gliserol karbonat dengan proses reaksi gliserolisis

Parameter	Annual Cost (Rp)
Capital investment	
Total direct cost	198.616.358.272,63
Total indirect cost	75.560.571.081,98
Fixed capital investment (FCI)	274.176.929.354,61
Working capital investment (WCI)	48.384.164.003,76
Total capital investment	322.561.093.358,37
Product cost	
Direct production costs	385.997.887.849,42
Fixed charges	32.444.472.944,64
Cost of manufacturing (COM)	483.331.306.683,33
General expenses	42.158.978.467,15
Total product cost (TPC)	621.641.523.528,47

Tabel 9. Analisis tekno-ekonomi produksi gliserol karbonat

Parameter	Nilai
Kapasitas pabrik	6.500 ton/tahun gliserol
Tahun operasi	20 tahun
Taxation rate	25%
Salvage value	48.384.164.003,76
Waktu Operasi	8.776 jam/tahun
Laju produksi tahunan	8.000 ton/tahun gliserol karbonat
Payback period	3,21 tahun
IRR (After taxes)	24%
NPV	483.331.306.683,33

4. Simpulan

Analisis teknis dan ekonomi produksi gliserol karbonat telah diteliti dalam studi ini. Cakupan kajian ini meliputi sintesis gliserol karbonat melalui reaksi gliserolisis dengan urea dan pemurnian produk. Simulasi proses dilakukan menggunakan perangkat lunak Aspen Plus. Reaktor dan kolom distilasi biasa cocok diterapkan untuk pembuatan produk gliserol karbonat. Proses yang diusulkan menghasilkan konversi gliserol sebesar 99,5% dan hasil gliserol karbonat sebesar 98,2% dengan tingkat kemurnian yang tinggi mencapai 99,93%. NPV, PP, dan IRR (setelah pajak) masing-masing dihitung sebesar 5.480.000 USD, 3,75 tahun, dan 20,9%. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa biaya bahan baku dan harga produk utama memiliki dampak signifikan terhadap NPV dan PP. Selain itu, agar proyek ini layak secara ekonomi, biaya gliserol mentah harus di bawah 0,44 USD/kg dan harga gliserol karbonat harus di atas 3,15 USD/kg.

Ucapan terima kasih

Penulis mengucapkan pada Fakultas Teknik Unila atas dukungan dana penelitian ini melalui dana DIPA FT 2024.

Daftar Pustaka

Alvarez Serafini, M., Gonzalez-Miranda, D., Tonetto, G., Garcia-Ochoa, F., & Ladero, M. (2023). Synthesis of Glycerol Carbonate from Ethylene Carbonate Using Zinc Stearate as a Catalyst: Operating Conditions and Kinetic Modeling. *Molecules*, 28(3).

Aresta, M., Dibenedetto, A., Nocito, F., & Ferragina, C. (2009). Valorization of bio-glycerol: New catalytic materials for the synthesis of glycerol carbonate via glycerolysis of urea. *Journal of Catalysis*, 268(1), 106–114.

Checa, M., Nogales-Delgado, S., Montes, V., & Encinar, J. M. (2020). Recent advances in glycerol catalytic valorization: A review. In *Catalysts* (Vol. 10, Issue 11, pp. 1–41). MDPI.

Chilakamarry, C. R., Sakinah, A. M. M., Zularisam, A. W., & Pandey, A. (2021). Glycerol waste to value added products and its potential applications. In *Systems Microbiology and Biomanufacturing* (Vol. 1, Issue 4, pp. 378–396). Springer.

Climent, M. J., Corma, A., De Frutos, P., Iborra, S., Noy, M., Velly, A., & Concepción, P. (2010). Chemicals from biomass: Synthesis of glycerol carbonate by transesterification and carbonylation with urea with hydrotalcite catalysts. The role of acid-base pairs. *Journal of Catalysis*, 269(1), 140–149.

Haider, M. H., Dummer, N. F., Knight, D. W., Jenkins, R. L., Howard, M., Moulijn, J., Taylor, S. H., & Hutchings, G. J. (2015). Efficient green methanol synthesis from glycerol. *Nature Chemistry*, 7(12), 1028–1032.

Jitjamnong, J., Khongprom, P., Ratanawilai, T., & Ratanawilai, S. (2023). Techno-economic analysis of glycerol carbonate production by glycerolysis of crude glycerol and urea with multi-functional reactive distillation. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8.

Lertlukkanasuk, N., Phiyanalinmat, S., Kiatkittipong, W., Arpornwichanop, A., Aiouache, F., & Assabumrungrat, S. (2013). Reactive distillation for synthesis of glycerol carbonate via glycerolysis of urea. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 70, 103–109.

Rizwanul Fattah, I. M., Ong, H. C., Mahlia, T. M. I., Mofijur, M., Silitonga, A. S., Ashrafur Rahman, S. M., & Ahmad, A. (2020). State of the Art of Catalysts for Biodiesel Production. *Frontiers in Energy Research*, 8(June), 1–17.

Teng, W. K., Ngoh, G. C., Yusoff, R., & Aroua, M. K. (2014). A review on the performance of glycerol carbonate production via catalytic transesterification: Effects of influencing parameters. *Energy Conversion and Management*, 88, 484–497.

Wang, H., & Ma, J. (2024). Reaction Kinetics and Mechanism for the Synthesis of Glycerol Carbonate from Glycerol and Urea Using ZnSO4 as a Catalyst. *Catalysts*, 14(1).

Zheng, Y., Chen, X., & Shen, Y. (2008). Commodity chemicals derived from glycerol, an important biorefinery feedstock. *Chemical Reviews*, 108(12), 5253–5277..