



Analisis Tekno-Ekonomi Produksi Zat Antara Farmasi Berdasarkan Kajian Konseptual Dan Simulasi Superpro Designer

Aulia Salsa Billah¹, Nadilla Putri², Nyimas Lisa Silviani³, Ahmad Paudhol Barokah⁴

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Kimia, Universitas Jambi, Indonesia

Email : auliasalsabila078@gmail.com¹; ndillaptriii@gmail.com² ;

Nyimasslisa23@gmail.com³, barokahoka5356w@gmail.com⁴

Abstract

The production of pharmaceutical intermediates is a crucial step in drug development, requiring high process and cost efficiency. This study aims to evaluate the technical and economic feasibility of synthetic intermediate production through a conceptual approach using SuperPro Designer software. The assessment was conducted based on secondary data from technical documents and relevant literature, then analyzed using industrial-scale batch process modeling. Several process scenarios were simulated, focusing on capacity scaling, cycle time efficiency, and equipment utilization, with particular attention to production cost, Return on Investment (ROI), and environmental impacts. The results show that the optimal scenario (SPhr8_5g) can produce 34,472 kg of product annually at a cost of USD 261.74/kg with an ROI of 28.66%. The largest operational costs stem from facility usage and raw materials, while gas emissions dominate waste treatment expenses. These findings suggest that simulation-based conceptual analysis provides a strong foundation for industrial-scale process planning and investment decision-making.

Keywords: Process Simulation, Pharmaceutical Intermediate, Economic Analysis, Superpro Designer, Technical Evaluation

Abstrak

Produksi zat antara farmasi merupakan tahapan penting dalam pengembangan obat, yang menuntut efisiensi tinggi dalam hal proses dan biaya. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kelayakan teknis dan ekonomi proses produksi zat antara sintesis dengan pendekatan konseptual menggunakan perangkat lunak SuperPro Designer. Kajian dilakukan berdasarkan data sekunder yang diperoleh dari dokumen teknis dan literatur terkait, kemudian dianalisis melalui pemodelan proses batch berskala industri. Simulasi dilakukan terhadap beberapa skenario peningkatan kapasitas, efisiensi waktu siklus, serta pemanfaatan peralatan, dengan fokus utama pada aspek biaya produksi, Return on Investment (ROI), dan dampak lingkungan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa skenario optimal (SPhr8_5g) mampu memproduksi 34.472 kg produk per tahun dengan biaya produksi sebesar USD 261,74/kg dan ROI sebesar 28,66%. Biaya operasional terbesar berasal dari penggunaan fasilitas dan bahan baku, sementara emisi gas mendominasi komponen biaya limbah. Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan berbasis simulasi dan kajian konseptual dapat memberikan gambaran awal yang kuat sebelum implementasi proses dalam skala industri.

Kata kunci: Simulasi Proses, Zat Antara Farmasi, Analisis Ekonomi, Superpro Designer, Evaluasi Teknis

PENDAHULUAN

Dalam industri farmasi modern, produksi zat antara sintetis merupakan tahapan kritis dalam proses pengembangan bahan aktif farmasi (API). Zat antara ini dibentuk melalui serangkaian reaksi kimia yang kompleks dan memerlukan prosedur pemisahan serta pemurnian yang ketat untuk menjamin kemurnian produk akhir. Salah satu contoh penting adalah reaksi kondensasi antara quinaldine dan hidrokuinon yang menghasilkan senyawa antara bernilai tinggi. Produksi zat ini memerlukan pengendalian yang dan presisi terhadap parameter reaksi, pemisahan fase cair, kristalisasi, serta proses pengeringan. Namun, proses ini juga menghasilkan limbah dalam jumlah besar karena rasio bahan mentah terhadap produk yang dihasilkan sangat rendah. Sebagai contoh, untuk menghasilkan satu kilogram produk utama, digunakan lebih dari 54 kg bahan baku dan pelarut, menunjukkan efisiensi proses yang rendah.

Pengembangan proses produksi dari skala laboratorium ke skala industri memerlukan pendekatan sistematis untuk menghindari terjadinya bottleneck pada peralatan atau waktu proses. Dalam studi ini, simulasi menggunakan perangkat lunak *SuperPro Designer* digunakan untuk memodelkan dan mengevaluasi proses *batch* yang terdiri atas tiga belas langkah unit prosedur, mulai dari reaksi klorinasi hingga penyimpanan produk. *SuperPro* menyediakan fitur yang memungkinkan pengguna mengevaluasi efisiensi penggunaan peralatan, menganalisis jadwal *batch*, dan menghitung kebutuhan bahan baku serta biaya produksi secara rinci. Contohnya, proses awal dengan kapasitas *batch* sebesar 55,7 kg memiliki waktu proses sekitar 74 jam dan menghasilkan 8.800 kg produk per tahun, tetapi dengan biaya produksi yang masih tinggi.

Melalui serangkaian skenario modifikasi, proses ini ditingkatkan dengan menambah siklus filtrasi, menambahkan reaktor dan filter baru, serta memisahkan *batch* menjadi dua bagian setelah tahap pemurnian awal. Strategi ini dilakukan untuk menggeser *bottleneck* dari satu unit ke unit lainnya secara terkendali, dengan tujuan akhir meningkatkan jumlah *batch* per tahun dan kapasitas per *batch* tanpa mengorbankan kualitas produk. Sebagai hasilnya, skenario akhir berhasil menghasilkan 246 kg produk per *batch* dengan total produksi tahunan sebesar 34.472 kg. Waktu proses memang meningkat menjadi 114 jam per *batch*, namun efisiensi proses secara keseluruhan membaik, dengan Return on Investment (ROI) mencapai 28,66%.

Selain meningkatkan efisiensi teknis, penggunaan simulasi juga mempermudah estimasi ekonomi proses. Dalam laporan evaluasi ekonomi terakhir, biaya operasional tahunan tercatat

sebesar \$8,5 juta dengan margin kotor mencapai 47,65% dan nilai NPV sebesar \$24,3 juta, yang menunjukkan kelayakan proyek secara finansial. Dengan pendekatan berbasis simulasi ini, proses perancangan tidak hanya didasarkan pada intuisi atau eksperimen fisik, tetapi juga pada data yang diperoleh dari model terverifikasi. Studi ini menunjukkan bahwa penggunaan perangkat lunak simulasi seperti *SuperPro Designer* dapat menjadi alat penting dalam pengembangan dan optimasi proses manufaktur farmasi yang kompleks.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan kualitatif melalui metode studi literatur terhadap dokumen teknis, laporan simulasi, dan referensi ilmiah yang relevan di bidang teknik proses kimia. Data primer diperoleh dari simulasi menggunakan perangkat lunak *SuperPro Designer*, yang digunakan untuk menggambarkan dan menganalisis seluruh tahapan proses produksi zat antara sintetis dari skala pilot hingga skala industri. Selain itu, kajian ini menggunakan data sekunder dari dokumen teknis internal yang menjelaskan alur proses, konsumsi bahan baku, dan evaluasi peralatan.

Langkah-langkah penelitian meliputi:

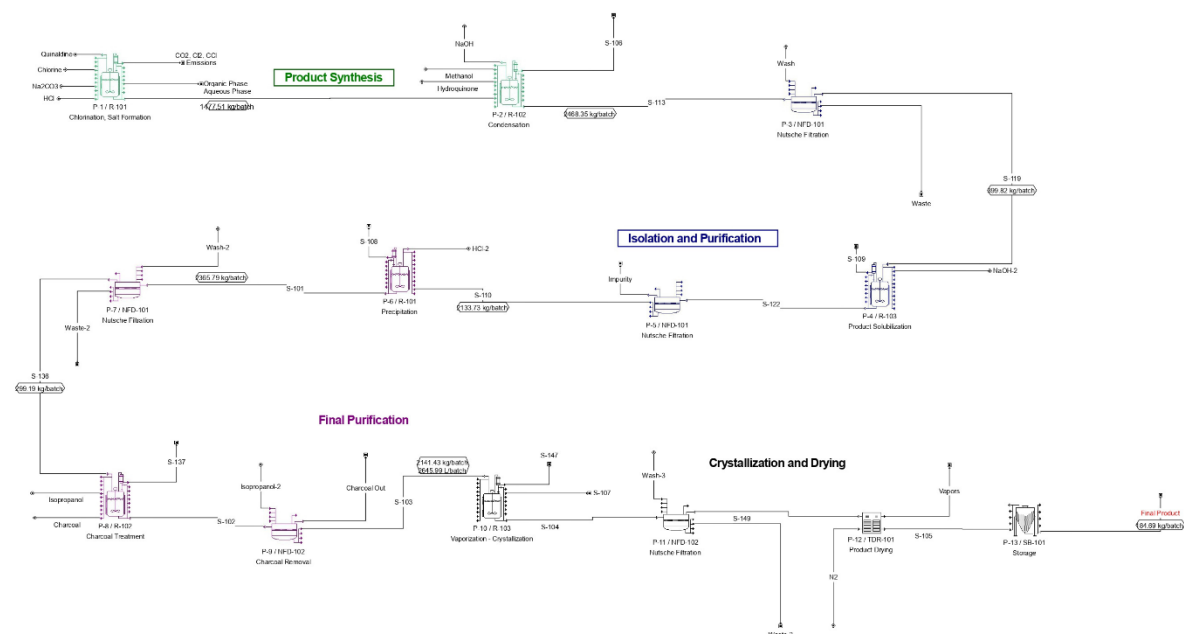
1. Identifikasi seluruh tahapan proses produksi yang disimulasikan, termasuk klorinasi, kondensasi, filtrasi, pemurnian, kristalisasi, dan pengeringan, serta karakteristik peralatan yang digunakan.
2. Analisis teknis berdasarkan grafik *Equipment Occupancy* dan *Throughput Analysis* untuk menilai *bottleneck* proses dan pemanfaatan peralatan.
3. Evaluasi ekonomi berdasarkan hasil simulasi untuk menilai kelayakan finansial, termasuk perhitungan biaya produksi, *Return on Investment* (ROI), dan *Net Present Value* (NPV).

Penelitian ini bersifat konseptual dan tidak melibatkan praktik laboratorium secara langsung. Kajian ini ditujukan untuk memberikan dasar analisis awal terhadap efisiensi proses dan potensi peningkatan kapasitas produksi pada sistem farmasi berbasis *batch*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam industri farmasi, produksi zat antara (*intermediate compound*) biasanya dilakukan melalui serangkaian tahapan kimia dan fisik yang kompleks. Setiap tahap memiliki

Reduced Cycle Time Due
Batch Size = 184.7 kg
Cycle Time = 52.50 h



(Gambar 1. Flowsheet Produksi Zat Antara Farmasi)

Proses produksi ini biasanya dimulai dari tahap reaksi kimia utama yang disebut *Product Synthesis*, di mana bahan baku utama seperti *quinaldine* dan *hidrokuinon* mengalami kondensasi dan reaksi lain yang membentuk senyawa target. Setelah terbentuk, senyawa hasil reaksi masih bercampur dengan pelarut, sisa reaktan, dan produk samping, sehingga perlu melewati tahapan *Isolation and Purification*. Pada tahap ini, proses seperti netralisasi, filtrasi, dan pengendapan digunakan untuk memisahkan senyawa target dari kontaminan yang tidak diinginkan.

Selanjutnya, senyawa hasil isolasi akan melalui *Final Purification*. Ini adalah tahap penting untuk meningkatkan kemurnian produk hingga standar farmasi, biasanya melalui penggunaan pelarut selektif, filtrasi lanjutan, dan kristalisasi vakum. Setelah produk mencapai kemurnian yang diinginkan, maka tahap terakhir adalah *Crystallization and Drying*, yaitu mengubah produk dalam bentuk cair atau suspensi menjadi bentuk kristal kering yang stabil dan siap disimpan. Ini dilakukan dengan alat seperti *tray dryer* atau *filter dryer*.

Setiap blok proses pada *flowsheet* mewakili unit operasi seperti reaktor, filter, tangki, atau alat pemanas, dan terhubung dengan aliran material dan pelarut yang digambarkan sebagai garis. Aliran tersebut menunjukkan arah perpindahan zat dari satu tahap ke tahap berikutnya, lengkap dengan titik masuk dan keluarnya limbah, pelarut, maupun produk. Diagram ini tidak hanya penting untuk memahami alur teknis, tetapi juga sebagai dasar dalam perancangan fasilitas, penjadwalan *batch*, hingga analisis ekonomi dan lingkungan dari proses produksi tersebut.

Evaluasi ekonomi pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kelayakan finansial dari proses produksi zat antara sintetis pada skala industri. Berdasarkan simulasi, proses ini mampu menghasilkan 34.472 kg produk kering per tahun. Proyeksi ini diperoleh dengan asumsi bahwa fasilitas beroperasi penuh selama 330 hari per tahun dan menjual produk dengan harga USD 500 per kilogram. Semua data dalam evaluasi ini menggunakan harga tahun 2010 sebagai acuan standar.

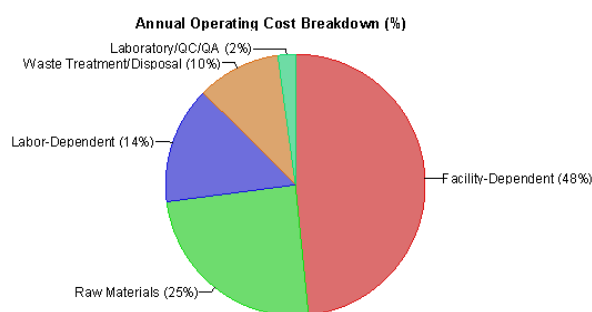
EXECUTIVE SUMMARY (2025 prices)	
Total Capital Investment	23,487,000 \$
Capital Investment Charged to This Project	23,487,000 \$
Operating Cost	8,499,000 \$/yr
Revenues	16,236,000 \$/yr
Cost Basis Annual Rate	32,472.00 kg MP/yr
Unit Production Cost	261.74 \$/kg MP
Unit Production Revenue	500.00 \$/kg MP
Gross Margin	47.65 %
Return On Investment	28.66 %
Payback Time	3.49 years
IRR (After Taxes)	21.17 %
NPV (at 7.0% Interest)	24,372,000 \$

Gambar 2. *Economic Evaluation*

Total investasi modal yang dibutuhkan untuk mendirikan fasilitas produksi tersebut sebesar USD 23.487.000. Angka ini mencakup seluruh pengeluaran awal untuk pembangunan pabrik dan instalasi peralatan. Sementara itu, biaya operasional tahunan mencapai USD 8.499.000, termasuk di dalamnya biaya bahan baku, tenaga kerja, pengolahan limbah, dan pemeliharaan fasilitas. Dari operasional tersebut, diproyeksikan pendapatan sebesar USD 16.236.000 per tahun, dengan basis produksi bersih sebesar 32.472 kg produk.

Berdasarkan data pada tabel “*Executive Summary*”, didapatkan bahwa biaya produksi per kilogram produk adalah sebesar USD 261,74, sedangkan pendapatan per kilogram mencapai USD 500. Hal ini menghasilkan margin kotor sebesar 47,65%. Evaluasi ini menunjukkan bahwa hampir setengah dari pendapatan merupakan keuntungan kotor setelah dikurangi biaya produksi. Selain itu, nilai *Return on Investment* (ROI) sebesar 28,66%

memperkuat indikasi bahwa proyek ini sangat menguntungkan secara finansial. Waktu balik modal (*payback time*) juga tergolong cepat, yaitu hanya 3,49 tahun.



Gambar 3. *Annual Operating Cost Breakdown*

Grafik pie di bawah tabel menunjukkan distribusi komponen biaya operasional tahunan. Biaya tertinggi berasal dari kategori “*Facility-Dependent*” (48%), yang mencakup depresiasi, pemeliharaan fasilitas, dan biaya tetap lainnya. Disusul oleh biaya bahan baku (25%) dan tenaga kerja (14%). Biaya untuk laboratorium/kontrol mutu serta pengolahan limbah masing-masing menyumbang 2% dan 10%. Distribusi ini menunjukkan bahwa keberhasilan efisiensi biaya lebih banyak ditentukan oleh pengelolaan fasilitas dan efisiensi penggunaan bahan.

Dalam proses produksi industri farmasi, khususnya untuk produk sintetis berbasis *batch* seperti yang dianalisis dalam studi ini, sangat penting untuk mengetahui bagian mana yang paling banyak menyerap biaya. Evaluasi ini bukan hanya sekadar menghitung total biaya produksi, tetapi juga bertujuan mengidentifikasi tahap-tahap mana yang paling dominan secara finansial, serta bahan baku mana yang paling mahal atau paling banyak digunakan. Hal ini dapat membantu dalam strategi efisiensi dan pengambilan keputusan investasi di masa depan.

SUMMARY PER SECTION				
Section	\$/kg MP	\$/batch	\$/year	%
Product Synthesis	88.354	21,735	2,869,035	33.76
Isolation and Purification	31.833	7,831	1,033,677	12.16
Final Purification	66.897	16,457	2,172,283	25.56
Crystallization and Drying	74.658	18,366	2,424,306	28.52
TOTAL	261.741	64,389	8,499,301	100.00

(Gambar 4. Biaya Operasional Tahunan)

Pertama, biaya operasional dianalisis berdasarkan tahap proses produksi, yang dibagi menjadi empat bagian utama: sintesis produk, isolasi dan pemurnian awal, pemurnian akhir, serta kristalisasi dan pengeringan. Pembagian ini berguna karena setiap tahap memerlukan peralatan, energi, serta bahan dengan karakteristik dan beban kerja yang berbeda. Misalnya, tahapan reaksi kimia tentu membutuhkan peralatan reaktor dan pengendalian suhu, sementara tahap pengeringan mungkin lebih fokus pada konsumsi energi panas.

Dari hasil simulasi, tahap sintesis produk ternyata menyumbang porsi biaya terbesar dari total biaya operasional tahunan. Ini menunjukkan bahwa proses awal yang melibatkan pembentukan senyawa utama merupakan bagian yang paling kompleks dan padat sumber daya. Diikuti oleh tahap kristalisasi dan pengeringan yang juga menyerap biaya cukup besar. Ini dapat dipahami karena proses kristalisasi membutuhkan waktu lama serta penggunaan pelarut organik yang cukup banyak, sedangkan pengeringan menyerap energi dalam jumlah besar.

MATERIALS COST - PROCESS SUMMARY				
Bulk Material	Unit Cost	Annual	Annual Cost	%
	(\$)	Amount	(\$)	
Carb. TetraCh	0.800	93,237 kg	74,589	3.57
Quinaldine	32.000	27,866 kg	891,716	42.73
Water	0.100	678,952 kg	67,895	3.25
Chlorine	3.300	16,783 kg	55,383	2.65
Na ₂ CO ₃	6.500	19,696 kg	128,026	6.14
HCl (20% w/w)	0.000	67,014 kg	0	0.00
NaOH (50% w/w)	0.150	38,344 kg	5,752	0.28
Methanol	0.240	103,726 kg	24,894	1.19
Hydroquinone	4.000	32,143 kg	128,573	6.16
Sodium Hydroxid	2.000	13,904 kg	27,808	1.33
HCl (37% w/w)	0.170	40,791 kg	6,934	0.33
Isopropanol	1.100	418,484 kg	460,333	22.06
charcoal	2.200	2,972 kg	6,538	0.31
Nitrogen	1.000	208,193 kg	208,193	9.98
TOTAL			2,086,635	100.00

Gambar 5. Biaya Bahan Baku (Raw Materials)

Selain dari sisi tahapan proses, analisis juga dilakukan terhadap penggunaan bahan baku. Biaya bahan baku merupakan salah satu komponen penting dalam produksi karena sangat berpengaruh terhadap harga akhir produk. Meskipun harga satuan beberapa bahan tergolong murah, jumlah yang digunakan dalam proses skala besar sangat signifikan. Sebaliknya, ada juga bahan yang harga satuannya tinggi, sehingga meskipun dipakai dalam jumlah kecil, kontribusinya terhadap total biaya tetap besar.

Efisiensi biaya dalam produksi tidak hanya bisa dicapai dengan mengurangi jumlah bahan, tetapi juga dengan mengoptimalkan tahapan proses tertentu yang dominan secara finansial. Dengan menggabungkan pemahaman tentang distribusi biaya per tahap dan per bahan baku, perusahaan dapat menetapkan prioritas dalam peningkatan proses, seperti mencari alternatif bahan, mengatur ulang jadwal *batch*, atau mengadopsi teknologi pemrosesan yang lebih hemat energi dan biaya.

WASTE TREATMENT/DISPOSAL COST (2025 prices) - PROCESS SUMMARY				
Waste Category	Unit Cost	Annual	Annual Cost	%
	(Rp)	Amount	(Rp)	
Solid Waste			14,999	1.70
Impurity	5.000	1,043 kg	5,217	0.59
Charcoal Out	2.000	2,446 kg	4,891	0.55
S-117	2.000	2,446 kg	4,891	0.55
Aqueous Liquid			361,220	40.97
Waste-3	1.000	86,185 kg	86,185	9.77
Organic Phase	2.000	94,425 kg	188,850	21.42
S-112	1.000	86,185 kg	86,185	9.77
Organic Liquid			0	0.00
Emissions			505,550	57.33
Emissions	4.000	11,881 kg	47,525	5.39
S-137	0.000	521 kg	0	0.00
S-147	0.000	302 kg	0	0.00
S-106	0.000	497 kg	0	0.00
Vapors	2.000	114,506 kg	229,013	25.97
S-108	0.000	344 kg	0	0.00
S-120	2.000	114,506 kg	229,013	25.97
S-125	0.000	0 kg	0	0.00
TOTAL			881,769	100.00

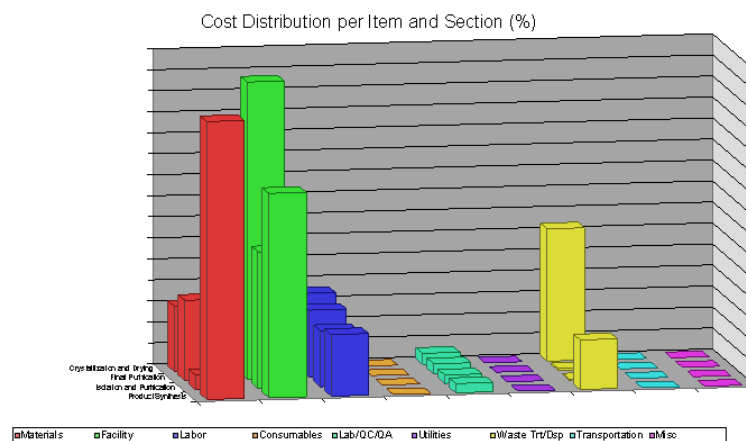
Gambar 6. Biaya Pengolahan Limbah

Selain menganalisis biaya produksi utama dan bahan baku, ini juga membahas biaya yang dikeluarkan untuk pengolahan dan pembuangan limbah. Dalam industri farmasi, pengolahan limbah menjadi salah satu komponen penting karena proses kimia yang digunakan menghasilkan berbagai limbah cair, padat, dan gas. Jika tidak ditangani dengan benar, limbah ini dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan dan memicu sanksi hukum. Oleh karena itu, alokasi dana untuk penanganan limbah merupakan aspek wajib yang harus diperhitungkan sejak awal.

Biaya pengolahan limbah diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori: limbah padat (seperti *charcoal* dan *impurity*), limbah cair (aqueous dan organic), serta emisi gas. Total biaya tahunan untuk penanganan limbah adalah sebesar USD 881.769. Yang paling besar berasal dari

emisi gas, yaitu mencapai USD 505.550 atau 57,33% dari total biaya limbah. Hal ini mengindikasikan bahwa emisi merupakan aspek paling berat dari sisi lingkungan dan biaya.

Kontribusi besar lainnya berasal dari *organic phase waste* (limbah pelarut organik), sebesar USD 188.850 atau sekitar 21,4%. Sedangkan limbah padat seperti *impurity*, *charcoal*, dan beberapa komponen lainnya memiliki porsi yang lebih kecil. Namun begitu, limbah padat tetap harus diproses secara khusus, misalnya melalui insinerasi atau penanganan kimiawi sebelum dibuang ke lingkungan. Biaya ini menambah beban operasional dan harus diperhitungkan dalam skema keseluruhan.



Gambar 7. Grafik *Cost Distribution Per Section*

Grafik ini menunjukkan distribusi biaya berdasarkan jenis pengeluaran (seperti bahan baku, tenaga kerja, fasilitas, kontrol mutu/laboratorium, dan limbah) serta bagian proses (sintesis, pemurnian, pengeringan, dll). Grafik ini memperlihatkan bahwa beban biaya terbesar secara umum berasal dari fasilitas (*Facility*), terutama pada tahap awal sintesis dan tahap akhir pengeringan.

Grafik ini membantu visualisasi hubungan antara jenis biaya dan tahap proses yang paling mempengaruhinya. untuk mencapai efisiensi maksimal, perhatian tidak hanya difokuskan pada bahan baku dan hasil akhir, tetapi juga pada pengelolaan limbah dan pemeliharaan fasilitas. Pengurangan emisi dan limbah organik, misalnya dengan mengganti pelarut yang lebih ramah lingkungan atau mendaur ulang limbah cair, bisa memberikan dampak langsung terhadap penurunan biaya dan peningkatan keberlanjutan proses.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan konseptual berbasis simulasi menggunakan *SuperPro Designer* dapat menjadi alat yang efektif untuk menganalisis dan mengoptimalkan proses produksi zat antara farmasi sebelum dilakukan implementasi dalam skala industri. Melalui pemodelan proses *batch* dan analisis berbagai skenario, diperoleh gambaran menyeluruh mengenai pemanfaatan peralatan, waktu proses, serta efisiensi biaya operasional. Skenario terbaik (SPhr8_5g) mampu menghasilkan output tahunan sebesar 34.472 kg dengan biaya produksi USD 261,74/kg dan *Return on Investment* (ROI) sebesar 28,66%, menunjukkan kelayakan ekonomi yang kuat.

Penelitian ini menegaskan pentingnya integrasi antara analisis teknis dan ekonomi dalam perencanaan proses produksi farmasi. Selain efisiensi proses, perhatian juga perlu diberikan pada pengelolaan limbah dan konsumsi energi, terutama pada tahap sintesis dan pengeringan yang menyerap biaya terbesar. Kajian ini dapat menjadi dasar awal untuk pengambilan keputusan investasi, serta memberikan arah bagi penelitian lanjutan yang berfokus pada peningkatan keberlanjutan proses, substitusi bahan baku, atau adopsi teknologi pemrosesan yang lebih ramah lingkungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada dosen pembimbing mata kuliah Ekonomi Teknik, serta seluruh pihak di Program Studi Teknik Kimia Universitas Jambi yang telah memberikan bimbingan, dukungan, dan fasilitas selama penyusunan artikel ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada rekan satu tim atas kerja sama dan kontribusi dalam proses analisis dan penyusunan naskah.

DAFTAR PUSTAKA

- Foo, D. C. Y. (2022). *Chemical Engineering Process Simulation* (2nd Ed.). Elsevier, 15(5). 1-8.
- Kechagias, E. P., Miloulis, D. M., Chatzistelios, G., Gayialis, S. P., & Papadopoulos, G. A. (2021). *Applying A System Dynamics Approach For The Pharmaceutical Industry: Simulation And Optimization Of The Quality Control Process*. *Polymers*, 12(4), 11-22.
- Tomczyk, L., Ciosek, P., & Dziugan, P. (2022). *Techno-Economic Analysis Of Succinic Acid Production From Sugar Beet Pulp Using Superpro Designer*. *Frontiers In Sustainability*, 3, 953942.

Ferreira, T. J. C., Azzoni, A. R., & Castro, A. M. (2021). *Techno-Economic Analysis Of Hyaluronic Acid Production By Streptococcus Zooepidemicus: A Comparison Between Batch And Fed-Batch Cultures*. *Processes*, 9(2), 241.

<https://www.intelligen.com/products/superpro-examples/>

<https://www.intelligen.com/products/superpro-overview/>