

SIMULASI KINERJA MAKSIMUM KAPASITAS REAKTOR PRODUKSI ROSIN ESTER DI PT INHUTANI V

Hanifah Ismi Hakimah¹, Haris Puspito Buwono², Desta Enggar Dwi Prasetya³

^{1,2}Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

³PT Inhutani V Unit Industri Trenggalek., Jl. Kanjeng Jimat, Surodakan, Trenggalek, 66316

hanifah.ismi30@gmail.com ; [haris.puspito@polinema.ac.id]

ABSTRAK

Ketersediaan getah pinus sebagai bahan baku rosin ester cukup banyak di Indonesia. Sedikitnya industri yang memproduksi rosin ester di Indonesia menjadikannya sebagai produk unggulan di PT Inhutani V. Rosin ester merupakan produk turunan dari gum rosin atau gondorukem yang telah direaksikan dengan alkohol melalui reaksi esterifikasi. PT Inhutani V menghasilkan bermacam macam produk olahan getah pinus diantaranya gum rosin, terpentin, serta dua jenis rosin ester yaitu *pentaerythritol* rosin ester dan *maleic* rosin ester. Sesuai dengan namanya, *maleic* rosin ester merupakan hasil reaksi antara gum rosin dengan asam maleat dan juga gliserol. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui seberapa banyak produk *maleic* rosin ester yang dapat dihasilkan dari memaksimalkan penggunaan reaktor dengan cara simulasi menggunakan *software* HYSYS V12. Dalam proses pembuatan rosin ester digunakan reaktor jenis CSTR dengan pemanas *HOB* (*Hot oil boiler*) serta bantuan *steam*. Waktu yang dibutuhkan untuk memproduksi 3.400 kg getah menjadi produk *maleic* rosin ester kurang lebih 12 jam dengan suhu reaksi 280°C, dihasilkan kurang lebih 3.000 kg rosin ester. Simulasi membutuhkan data massa bahan masuk, suhu, tekanan, dan mekanisme reaksi dari *maleic* rosin ester. Simulasi dilakukan pada kondisi aktual kemudian ditambahkan variabel massa bahan masuk yaitu 3, 4, 5, 6, dan 7 ton. Dari hasil simulasi dapat diketahui tangki reaktor mampu menghasilkan *maleic* rosin ester hingga 6.204 kg dengan asumsi digunakan 3 unit tangki reaktor dengan hasil konversi reaksi sebesar 89,4%.

Kata kunci: esterifikasi, *maleic* rosin ester, simulasi

ABSTRACT

Pine resin is widely available in Indonesia as a raw material for rosin ester. PT Inhutani V is one of the few Indonesian industries that produce rosin ester, a superior product. Rosin ester is a derivative of gum rosin, also known as gondorukem, which has been reacted with alcohol through an esterification reaction. PT Inhutani V produces various processed pine resin products, including gum rosin, turpentine, and two types of rosin esters: pentaerythritol rosin ester and maleic rosin ester. As its name implies, maleic rosin ester is the result of gum rosin reacting with maleic acid and glycerol. This study aims to determine the maximum production of maleic rosin ester by simulating the use of reactors with HYSYS V12 software. In the process of making rosin ester, a CSTR type reactor with a hot oil boiler (HOB) heater and steam assistance is used. It takes approximately 12 hours to produce 3,400 kg of sap into 3,000 kg of maleic rosin ester at a reaction temperature of 280 °C. The data required for the simulation include the mass of the incoming material, the temperature, the pressure, and the reaction mechanism of the maleic rosin ester. First, the simulation is carried out under actual conditions. Then, the variable mass of the incoming material is added: 3, 4, 5, 6, and 7 tons. The simulation results show that the reaktor tank can produce up to 6,204 kg of maleic rosin ester with three reaktor tank units and a reaction conversion of 89.4%.

Keywords: esterification, *maleic* rosin ester, simulation

1. PENDAHULUAN

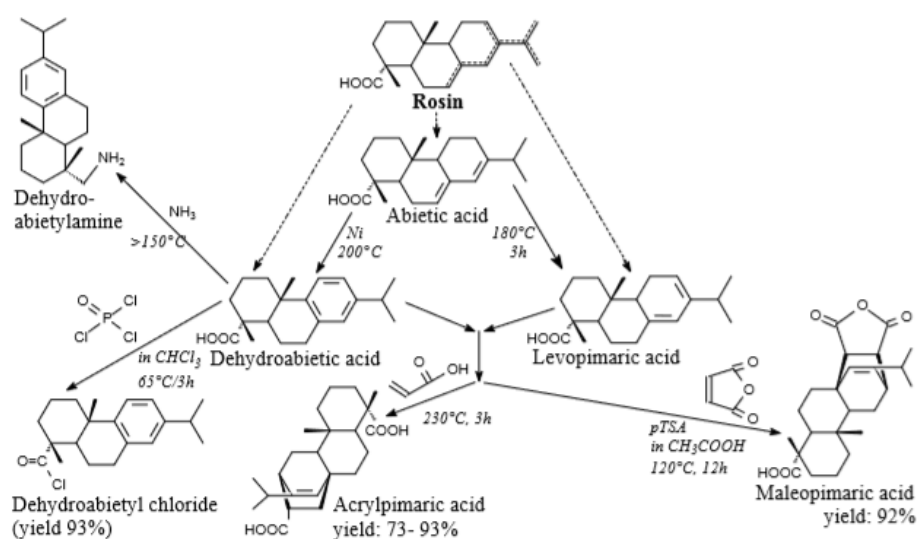
Indonesia menjadi salah satu negara yang memproduksi gum rosin terbesar ketiga setelah Tiongkok dan Brazil dengan kapasitas produksi mencapai 60.000 ton per tahun [1]. Dalam literatur lain menyebutkan produksi gum rosin mencapai hingga 70.000 ton per tahun dengan kontribusi Indonesia mencapai sekitar 8% [2]. Volume produksi pengolahan getah pinus di Indonesia pada tahun 2021 mencapai 81.788 ton, dengan volume produk gondorukem mencapai 59.451 ton dan produk terpentin mencapai 12.628 ton [3]. Pada tahun 2018 produksi gum rosin di Indonesia mencapai 65.646 ton, dengan 4.259 ton dijual untuk dalam negeri, sedangkan sebanyak 62.903 ton diekspor ke berbagai negara [4].

Rosin terdiri dari campuran kompleks asam organik dengan berat molekul besar dan material netral. Rosin memiliki bagian-bagian kecil yang tidak bersifat asam maupun netral. Bagian-bagian ini terdiri dari aldehida, alkohol, ester, dan hidrokarbon dengan berat molekul tinggi yang memiliki struktur seperti asam rosin. Rosin tersusun atas 10% unsur netral dan 90% unsur asam [5]. Rosin diklasifikasikan ke dalam berbagai kategori berdasarkan bagian pohon asalnya, yaitu gum rosin, *tall oil* rosin, dan *wood* rosin. Gum rosin diperoleh dari pohon pinus hidup, sementara *tall oil* rosin dihasilkan sebagai produk sampingan dari bubur kertas [5]. Gum rosin atau bisa disebut gondorukem merupakan hasil pemisahan dari getah pinus dengan minyak terpentin. Minyak terpentin yang terkandung dalam getah pinus berkisar antara 10%-17,5%. Getah pinus yang segar menghasilkan persentase terpentin yang lebih tinggi [6].

Proses pembuatan gum rosin meliputi pencucian getah, pemisahan getah dari pengotor halus dengan bantuan asam oksalat, dan distilasi getah pinus untuk memisahkan rosin dan minyak terpentin. Di dalam distilasi, gum rosin merupakan hasil yang tertinggal dalam tangki distilasi, sedangkan terpentin merupakan uap yang keluar meninggalkan tangki distilasi. Ketika keluar dari tangki distilasi, terpentin yang berada dalam fase uap akan terkondensasi menjadi fase *liquid* [7].

Gum rosin biasanya digunakan sebagai bahan baku pada industri batik, kulit, cat, kertas, vernis, kosmetik, dan sabun cuci. Sedangkan minyak terpentin biasanya digunakan pada industri cat, semir sepatu, pelarut bahan organik dan pembuatan kamper sintetik [2]. Kualitas gum rosin ditentukan dengan mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI) 7636:2020 [8]. Kualitas gum rosin digolongkan ke dalam sifat fisik yaitu berat jenis, titik lunak, warna, persen transmisi, dan kerapuhan serta sifat kimia yaitu bilangan asam, bilangan penyabunan, bilangan ester, bilangan iodin tak tersabun, kadar kotoran, kadar air, dan kadar terpentin tersisa [6].

Gum rosin terdiri dari sekitar 95% asam resin yang secara umum digolongkan menjadi dua, yaitu tipe abietat dan pimarat. Jenis asam resin tipe abietat adalah asam abietat, asam levopimarat, asam palustrat, asam nanoabietat, dan asam dehidroabietat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Sedangkan jenis asam resin tipe pimarat adalah asam pimarat, asam pimarat sandarako, dan asam pimarat iso [3].



Gambar 1. Sintesis substrat/intermediet berbasis rosin esensial (Sumber [9])

Potensi modifikasi yang tinggi dari turunan rosin memungkinkan pembuatan resin dan monomer dengan sifat yang beragam dan dapat dirancang. Resin dan monomer ini dapat menunjukkan suhu transisi gelas yang dapat disesuaikan, penyusutan volume yang rendah, serta meningkatkan *modulus* elastisitas, *modulus Young*, memori bentuk, ketahanan api, dan fitur perlindungan korosi pada cetakan/polimer akhir dibandingkan dengan senyawa berbasis minyak bumi [9]. Saat ini gum rosin yang termodifikasi lebih banyak digunakan di industri daripada gum rosin non modifikasi. Hal ini karena penggunaan gum rosin non modifikasi mempunyai kelemahan untuk penggunaan di atas, misalnya sering terjadi kristalisasi, terjadi proses oksidasi secara alami terhadap gondorukem dan dapat bereaksi dengan garam-garam logam berat terutama pada penggunaan untuk vernis [10].

Salah satu jenis gum rosin termodifikasi adalah rosin ester. PT Inhutani V memproduksi dua jenis rosin ester yaitu *pentaerythritol* rosin ester dan *maleic* rosin ester. Rosin ester biasa digunakan pada industri makanan yaitu untuk meningkatkan kemampuan emulsi, kestabilan pada nilai pH dan sebagai *tackifier* yaitu untuk memberi penampilan potongan permukaan yang lembut, kenyal, dan bagus dari gum *base* yang manis [10].

Pembuatan rosin ester melalui reaksi esterifikasi gum rosin dengan gugus alkohol. *Pentaerythritol* rosin ester merupakan reaksi asam karboksilat dari gum rosin dengan *Pentaerythritol*, sedangkan *maleic* rosin ester merupakan reaksi dari rosin dengan asam maleat kemudian direaksikan dengan gliserol. Pada umumnya, terdapat tiga metode reaksi pembuatan *maleic* rosin ester. Metode pertama yaitu rosin, gliserol dan asam maleat direaksikan bersama, metode kedua yaitu rosin direaksikan pertama dengan asam maleat, untuk memproduksi *adduct* kemudian diesterifikasi dengan gliserol, dan metode ketiga yaitu mereaksikan asam maleat dengan gliserol kemudian diikuti oleh penambahan rosin [11].

Proses esterifikasi adalah proses pereaksian antara asam karboksilat dengan alkohol yang menghasilkan ester sebagai produk utama dan air sebagai produk samping. Jenis asam karboksilat yang terkandung dalam gum rosin adalah asam abietat. Asam abietat memiliki gugus karboksilat yang berpotensi membentuk zat ester yang memungkinkan polimerisasi, ikatan silang, dan matriks polimer [9].

Gum rosin dari PT Inhutani V memiliki rata-rata kandungan asam abietat 30% - 40% [12]. Ester asam karboksilat ialah suatu senyawa yang mengandung gugus $-CO_2 R'$ dan R dapat berupa alkil maupun aril. Esterifikasi dapat dilangsungkan dengan katalis asam dan bersifat *reversible* [11]. Dalam literatur lain menyebutkan bahwa reaksi esterifikasi asam abietat dan gliserol bersifat *irreversible* berdasarkan simulasi perhitungan kinetika reaksi [13].

Reaksi rosin dan gliserol dapat ditingkatkan dengan menambahkan katalis seperti cairan ionik asam *Lewis* tanah jarang dan enzim seperti lipase [13]. Pembuatan gum ester melalui reaksi esterifikasi antara gum rosin dan gliserol menggunakan katalis zeolit yang dimodifikasi dengan logam nikel sebagai didapatkan hasil terbaik pada suhu 240 °C dengan penambahan gliserol 11% dan didapatkan konversi sebesar 82,86% [12].

PT Inhutani V memproduksi rosin ester menggunakan reaktor jenis CSTR ber-jacket dengan *HOB* (*Hot oil boiler*) di dalam *coil* yang mengelilingi tangki serta bantuan panas *steam* untuk mengatur suhu dalam reaktor. Pembuatan rosin ester memerlukan suhu yang cukup tinggi di atas 200 °C dengan waktu pembuatan yang cukup lama jika dibandingkan dengan gum rosin yaitu kurang lebih 12 jam.

Sedikitnya industri yang memproduksi rosin ester di Indonesia menjadikan rosin ester sebagai produk unggulan di PT Inhutani V. Terdapat delapan pabrik gum rosin di seluruh Indonesia, mengingat potensi ekspor gum rosin sangat tinggi membuat kemungkinan didirikannya pabrik gum rosin lebih banyak [4]. Untuk mencukupi kebutuhan tersebut maka produksi gum rosin untuk diturunkan menjadi produk rosin ester harus selalu di tingkatkan dalam beberapa tahun ke depan. Dalam peningkatan produksi perlu mempertimbangkan beberapa aspek salah satunya adalah massa bahan yang dibutuhkan untuk menghasilkan produk agar sesuai dengan target yang diinginkan. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan simulasi mengenai peningkatan produksi *maleic* rosin ester berbasis simulasi proses menggunakan *software*.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Simulasi proses pembuatan *maleic* rosin ester menggunakan *software* HYSYS V12 (*licensed*) untuk mengetahui jumlah produk yang dihasilkan setelah diberikan variabel massa bahan masuk. Data yang diperlukan untuk simulasi didapatkan dari observasi langsung di PT Inhutani V seperti massa bahan masuk, suhu reaksi, dan tekanan. Jenis reaktor yang digunakan adalah jenis CSTR dengan kondisi operasi yang dijelaskan pada Tabel 1. Penggunaan reaktor jenis CSTR dalam simulasi membutuhkan data kinetika reaksi dengan jenis reaksi kinetik. Nilai kinetika didapatkan dari literatur yaitu *A* (*pre-exponential factor*) dan *E_a* (*activation energy*).

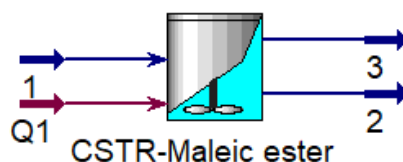
Tahap pertama simulasi adalah memasukkan *component* atau senyawa reaktan dan produk. Kemudian menentukan jenis *fluid package* dan memasukkan reaksi pembuatan *maleic* rosin ester. Simulasi dilakukan pada kondisi aktual terlebih dahulu untuk memastikan bahwa kondisi operasi yang digunakan sudah tepat berdasarkan massa produk yang dihasilkan. Selanjutnya dilakukan simulasi pada variabel massa bahan masuk yaitu 3, 4, 5, 6, dan 7 ton. Data aktual kondisi operasi produksi *maleic* rosin ester ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kondisi operasi aktual produksi *maleic* rosin ester

Parameter	Nilai
Massa bahan	3.400 kg
Massa produk	3.000 kg
Suhu	280 °C
Tekanan	500 kPa
Kinetika reaksi	A = 7,07E+4 kg/mol.min Ea = 65,81 kJ/mol

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam pembuatan satu *batch maleic* rosin ester digunakan dua tangki reaktor dengan massa bahan masuk 3.400 kg. Terdapat dua aliran keluar tangki yaitu aliran bawah sebagai produk ester dan aliran atas sebagai kondensat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

**Gambar 2.** Aliran proses pembuatan *maleic* rosin ester

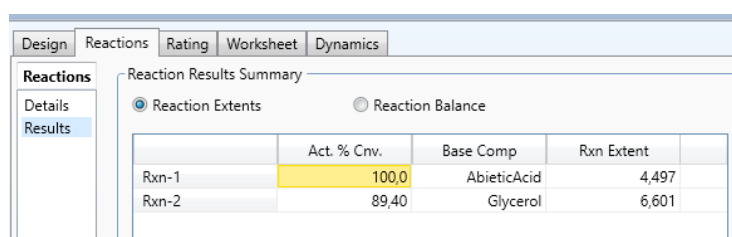
Senyawa organik memiliki kandungan senyawa yang kompleks maka dalam simulasi cukup memasukkan senyawa terbesar. Pada gum rosin atau gondorukem kandungan senyawa terbesar adalah asam abietat, maka dalam simulasi digunakan asam abietat sebagai reaktan yang bereaksi dengan asam maleat yang disebut sebagai reaksi fortifikasi. Fortifikasi adalah proses modifikasi gondorukem dengan cara penambahan senyawa asam yang mengandung gugus karboksil ke dalam gondorukem dengan menggunakan suhu reaksi yang tinggi yaitu berkisar antara 150°C sampai dengan 210°C. Jenis senyawa asam yang sering digunakan dalam proses fortifikasi adalah asam maleat atau asam toksilat, yaitu asam karboksilat tak jenuh dengan rumus kimia $C_4H_4O_4$ [3]. Kemudian dilanjutkan dengan reaksi esterifikasi rosin dengan gliserol menghasilkan rosin ester dan air.

Cont. Stirred Tank Reactor: CSTR-Maleic ester - Set-1				
	Design	Reactions	Rating	Worksheet
Worksheet	Name	1	2	3
Conditions	Vapour	0,0000	0,0000	1,0000
Properties	Temperature [C]	170,0	280,0	280,0
Composition	Pressure [kPa]	500,0	500,0	500,0
PF Specs	Molar Flow [kgmole/h]	30,26	14,50	4,235
	Mass Flow [kg/h]	3400	3024	376,4
	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	2,956	3,547	0,4189
	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-6,478e+005	-3,820e+005	-3,803e+005
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	132,4	773,3	370,0
	Heat Flow [kJ/h]	-1,960e+007	-5,539e+006	-1,611e+006

Gambar 3. Hasil simulasi pada kondisi aktual bahan masuk (1), produk *maleic* rosin ester (2), dan produk samping (3)

Simulasi dilakukan pada kondisi aktual dengan kondisi operasi tertera dalam Tabel 1 dan didapatkan massa produk yaitu 3.024 kg seperti yang ditunjukkan Gambar 3, dengan kandungan ester sebanyak 2.814 kg yang ditunjukkan pada Tabel 2. Hasil tersebut sesuai dengan kondisi aktual di mana massa produk *maleic* rosin ester berada di kisaran 3.000 kg.

Dari simulasi juga dapat diketahui massa kandungan ester dalam produk akhir sehingga dapat diperkirakan kualitas produk yang dihasilkan. Jumlah kandungan ester yang dihasilkan dipengaruhi oleh konversi reaksi, di mana dalam simulasi ini konversi reaksi dari asam rosin setelah fortifikasi atau *adduct* dengan gliserol adalah 89,4% yang ditunjukkan pada Gambar 4. Proses esterifikasi ditandai dengan penurunan nilai asam rosin, yang meningkatkan konversi esterifikasi [5].



	Act. % Cnv.	Base Comp	Rxn Extent
Rxn-1	100,0	AbieticAcid	4,497
Rxn-2	89,40	Glycerol	6,601

Gambar 4. Konversi reaksi pertama dan reaksi kedua *maleic* rosin ester

Konversi reaksi rosin ester juga dipengaruhi oleh jenis katalis yang digunakan. Katalis yang digunakan pada reaksi esterifikasi pada umumnya adalah katalis asam. Jika reaksi dilakukan tanpa menggunakan katalis, reaksi esterifikasi dapat dilakukan pada suhu diatas 250 °C. Reaksi esterifikasi pada gum rosin dapat dilakukan pada suhu optimal 280 °C [1]. Reaksi esterifikasi dapat dilakukan dengan atau tanpa katalis, tetapi konversinya akan rendah jika dilakukan tanpa katalis. Ester rosin yang diharapkan dengan bilangan asam rendah diperoleh dengan memanaskan rosin dengan gliserol pada suhu 250-290 °C [5]. ZSM-5 dan zeolit alam secara efektif meningkatkan konversi rosin menjadi *GRE* melalui esterifikasi. Laju konversi tertinggi yang dicapai adalah 98% dan *softening point* 103 °C [5]. ZSM-5 sintesis dilaporkan menghasilkan bilangan asam yang lebih rendah dan stabilitas rosin ester yang lebih baik, dengan konversi sebesar 94%. ZSM-5 yang di doping La meningkatkan konversi menjadi 98% [14]. Zeolit alam yang dimodifikasi dengan nikel juga telah diselidiki, dengan konversi sebesar 83% [12].

Setelah simulasi pada kondisi aktual, ditambahkan variabel massa bahan masuk yaitu 3.000, 4.000, 5.000, 6.000, 7.000 kg. Variabel dilakukan hingga 7.000 kg karena mengikuti kapasitas tangki yang tersedia yaitu 3 tangki reaktor dengan kapasitas masing masing reaktor adalah 3,5 ton. Dari variabel tersebut didapatkan hasil yang tertera pada Tabel 2 dan grafik pada Gambar 5.

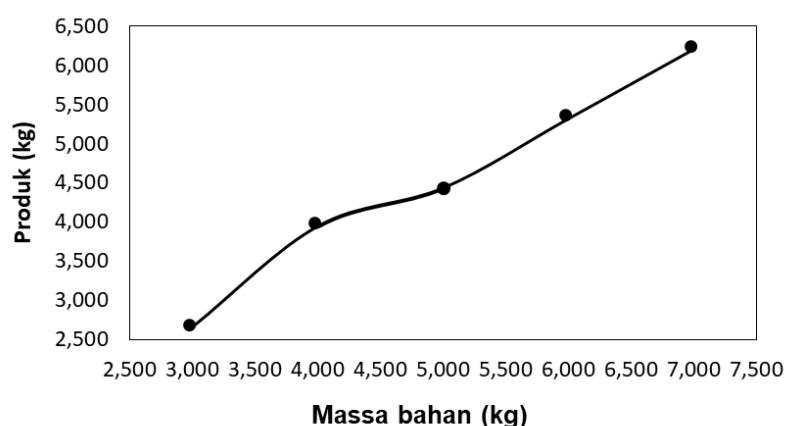
Dari Tabel 2 diketahui jika massa bahan 3.000 kg menghasilkan total produk 2.659 kg, massa bahan 4.000 menghasilkan total produk 3.945 kg, massa bahan 5.000 kg menghasilkan total produk 4.431 kg, massa bahan 6.000 kg menghasilkan total produk 5.318 kg, dan massa bahan 7.000 kg menghasilkan total produk 6.204 kg.

Kemudian dilakukan perhitungan *yield* dari total produk yang dihasilkan pada persamaan satu menggunakan *Microsoft Excel* agar perhitungan lebih akurat. *Yield* ditentukan dengan membandingkan massa akhir gondorukem yang didapatkan dari proses

distilasi dengan massa getah awal [15]. Untuk nilai *yield maleic* rosin ester ditentukan dengan membandingkan massa produk *maleic* rosin ester dengan massa bahan baku menggunakan rumus pada Persamaan 1.

Tabel 2. Hasil simulasi peningkatan kapasitas produksi terhadap kandungan produk *maleic* rosin ester

	Massa bahan (kg)	Total produk (kg)	Kandungan ester (kg)	Yield (%)
Aktual	3.400	3.024	2.814,12	88,94
Case 1	3.000	2.659	2.483,04	88,63
Case 2	4.000	3.945	3.310,73	98,63
Case 3	5.000	4.431	4.138,41	88,62
Case 4	6.000	5.318	4.966,09	88,63



Gambar 5. Grafik hasil simulasi peningkatan kapasitas produksi terhadap kandungan produk *maleic* rosin ester

$$Yield = \frac{\text{massa produk}}{\text{massa bahan baku}} \times 100\% \quad (1)$$

Dari perhitungan tersebut didapatkan nilai *yield* kondisi aktual adalah 88,94%. Pada variabel massa bahan didapatkan nilai *yield* sebesar 88,6% hingga 98,6%. Semakin besar nilai produk yang dihasilkan semakin tinggi juga nilai *yield*nya.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil simulasi, tangki reaktor mampu menghasilkan *maleic* rosin ester hingga 6.204 kg dengan penggunaan 3 unit tangki reaktor. Dengan penambahan penggunaan tangki reaktor dapat dihasilkan produk *maleic* rosin ester yang lebih banyak dengan waktu produksi yang sama. Nilai *yield* yang didapatkan berada di kisaran 88,6%-88,9%.

Konversi reaksi pembuatan *maleic* rosin ester adalah 89,4%, di mana angka tersebut masih tergolong rendah. Pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan simulasi peningkatan konversi reaksi dengan menambah variabel kondisi operasi seperti suhu dan tekanan serta efisiensi energi yang dibutuhkan.

REFERENSI

- [1] F. F. Shufa, "Studi Ratio Mol Gum Rosin/Asam Fumarat dan Konsentrasi Katalis P-Toluene Sulfonic Acid (PTSA) pada Esterifikasi Fumaric Modified Rosin Ester," Skripsi, Universitas Negeri Semarang, Semarang, 2020.
- [2] A. Primaningtyas dan R. Widyorini, "Evaluasi proses produksi industri gondorukem dari tinjauan aliran massa dan energi (Studi kasus PGT Sapuran)," *Jurnal Riset Industri Hasil Hutan*, vol. 12, no. 1, hal. 39–52, 2020.
- [3] F. N. Bratastuti, P. H. Suharti, dan R. Ramadhana, "Kajian Literatur Peningkatan Kualitas Gondorukem Termodifikasi," *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 10, no. 2, hal. 357–369, 2024.
- [4] A. Salsabila dan A. Chumaidi, "Studi Literatur Perencanaan Bisnis Pembuatan Disproportionated Rosin Sebagai Komiditi Ekspor Dengan Bahan Baku Gondorukem," *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 8, no. 3, hal. 502–508, 2022.
- [5] M. Mardiah, T. W. Samadhi, W. Wulandari, A. Aqsha, Y. A. Situmorang, dan A. Indarto, "Recent Progress on Catalytic of Rosin Esterification Using Different Agents of Reactant," *AgriEngineering*, vol. 5, no. 4, hal. 2155–2169, 2023.
- [6] D. P. Kurniawan, R. W. Ashadi, dan Arif, "Penentuan Waktu Baku dan Analisis Keseimbangan Lini Produksi pada Industri Pengolahan Gondorukem dan Terpentin," *Jurnal Pertanian*, vol. 6, no. 2, hal. 88–91, 2015.
- [7] Y. Suranto, "Karakter dan Kualitas Gondorukem Kuna Hasil Penemuan di Pemukiman Pecinan Kutoarjo Kabupaten Purworejo," *Jurnal Konservasi Cagar Budaya Borobudur*, vol. 12, no. 2, hal. 47–60, 2018.
- [8] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 7636:2020 Gondorukem," 2020.
- [9] S. Kugler, P. Ossowicz, K. Malarczyk-Matusiak, dan E. Wierzbicka, "Advances in Rosin-Based Chemicals: The Latest Recipes, Applications and Future Trends," *Molecules*, vol. 24, no. 9, 2019.
- [10] M. A. Rachmawati, "Esterifikasi Gondorukem Maleat dengan Gliserol," Skripsi, Institut Pertanian Bogor, Bogor, 2011.
- [11] A. E. Prasetyo, A. Widhi, dan W. Widayat, "Potensi Gliserol dalam Pembuatan Turunan Gliserol Melalui Proses Esterifikasi," *Jurnal Ilmu Lingkungan*, vol. 10, no. 1, hal. 26–31, 2012.
- [12] H. Dewajani, A. Chumaidi, M. A. I. Iswara, R. Khasanah, dan T. D. Agustina, "Synthesis Ester Gum through Esterification Reaction of Rosin and Gliserol Using Zeolite Modified by Nickel as Catalyst," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2097, hal. 030037, 2019.
- [13] D. T. Hartanto, R. Rochmadi, M. P. Wahyu, dan D. Kusumawati, "Characteristics and Kinetics Study of Glycerolabietate from Glycerol and Abietic Acid from Rosin," *Jurnal Rekayasa Proses*, vol. 15, no. 2, hal. 170–181, 2021.
- [14] X. Wang, F. Guo, Y. Yu, Z. Liu, Y. Wang, H. Sun, X. Liu, Y. Xue, X. Wei, dan S. Guo, "Study on the Synthesized Rosin Glyceride over LaZSM-5 Zeolite Catalyst Synthesized by the in Situ Method," *ACS Omega*, vol. 5, no. 49, hal. 31543–31550, 2020.
- [15] A. Syaifuddin, K. Sa'diyah, dan D. E. D. Prasetya, "Peningkatan Kualitas Gondorukem dengan Variasi Konsentrasi Terpentin pada Pencucian Getah Pinus," *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, vol. 43, no. 1, hal. 10–20, 2025.