Jurnal Otomasi Kontrol dan Instrumentasi Vol 18 (2), 2026 ISSN: 2085-2517
https://doi.org/10.5614/joki.2026.18.2.6 E-ISSN: 2460-6340

Pemodelan Prediktif Berbasis Aspen HYSYS untuk Estimasi Kandungan Rhodinol pada Proses Distilasi Fraksinasi Vakum Minyak Sereh Wangi Skala Pilot: Evaluasi Kesesuaian terhadap Data Eksperimen

Predictive Modeling Based on Aspen HYSYS for Rhodinol Content Estimation in Pilot-Scale Vacuum Fractional Distillation of Citronella Oil: Agreement Evaluation with Experimental Data

[1]Fadli Hastito*), [1]Yusuf Affandi, [1]Sabar Sabar, [1]Achmad Chalid Afif Alfajrin, [1]Rhahmi Adni Pesma, [1]Mardhiyatna, [1]Rizki Yustisia Sari, [1]Gelard Unthirta Pratama, [2]Frida Yassar Maula

[1]Rekayasa Instrumentasi dan Automasi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan 35365, Indonesia

[2]Teknik Biosistem, Faculty of Industrial Technology, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan 35365, Indonesia

*) *corresponding email: fadli.hastito@ia.itera.ac.id*

Abstrak

Minyak sereh wangi merupakan salah satu minyak atsiri yang banyak dimanfaatkan sebagai bahan baku industri parfum, kosmetik, farmasi, dan produk berbasis bahan alami karena mengandung rhodinol (citronellol dan geraniol) yang bernilai ekonomi tinggi. Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengevaluasi pemodelan proses distilasi fraksinasi vakum berbasis perangkat lunak Aspen HYSYS untuk memprediksi kandungan relatif rhodinol dari minyak sereh wangi serta mengevaluasi kesesuaiannya dengan proses aktual pada skala pilot. Bahan baku dikarakterisasi menggunakan Gas Chromatography Mass Spectrometry (GCMS) dan pengujian sifat fisikokimia. Pemodelan dilakukan dengan variasi tekanan vakum, suhu *reboiler*, dan rasio refluks untuk menentukan kondisi operasi yang diuji pada unit distilasi fraksinasi vakum skala pilot melalui tiga percobaan, dengan membandingkan kandungan relatif rhodinol hasil pemodelan dan eksperimen berdasarkan persentase *error*. Hasil menunjukkan kondisi operasi pada percobaan ketiga menghasilkan kandungan relatif rhodinol tertinggi sebesar 66,51% pada tekanan 26 mbar, suhu *reboiler* 134°C, dan rasio refluks 6:1, dengan persentase *error* prediksi berkisar 25,01–42,80% dan *error* terendah pada percobaan ketiga. Temuan ini menunjukkan model Aspen HYSYS mampu memberikan kecenderungan prediksi yang mendukung perancangan kondisi operasi, tetapi masih memiliki deviasi terhadap kondisi aktual skala pilot, sehingga diperlukan penyempurnaan parameter model, kondisi operasi, dan asumsi proses untuk meningkatkan keandalan model pada pengembangan proses skala lebih besar.

Kata Kunci: minyak sereh wangi, rhodinol, fraksinasi vakum, Aspen HYSYS, skala pilot.

Abstract

Citronella oil is an essential oil widely used in the perfume, cosmetic, pharmaceutical, and natural-product industries owing to its high-value rhodinol content (citronellol and geraniol). This study aims to develop and evaluate a vacuum fractional distillation process model based on Aspen HYSYS software to predictive the relative rhodinol content of citronella oil and evaluate its agreement with the actual pilot-scale process. Feedstock characterization used GCMS and physicochemical testing. Modeling was performed by varying vacuum pressure, reboiler temperature, and reflux ratio to determine operating conditions tested on a pilot-scale vacuum fractional distillation unit through three experiments, comparing the relative rhodinol content from the model and experiments based on percentage error. Results show the third experiment produced the highest relative rhodinol content of 66.51% at 26 mbar, a reboiler temperature of 134°C, and a reflux ratio of 6:1, with prediction error ranging from 25.01% to 42.80% and the lowest error in the third experiment. These findings indicate the Aspen HYSYS model provides a predictive trend supporting the design of operating conditions but still shows deviation from actual pilot-scale conditions, indicating the need to refine model parameters, operating conditions, and process assumptions to improve model reliability for larger-scale process development.

Keywords: citronella oil, rhodinol, vacuum fractionation, Aspen HYSYS, pilot scale

Makalah diterima 16 Maret 2026 – makalah direvisi 12 Agustus 2026 – disetujui 14 September 2026

Karya ini adalah naskah akses terbuka dengan lisensi CC BY-SA.

1 Pendahuluan

Minyak atsiri dari tanaman *Cymbopogon*, khususnya minyak sereh wangi (*citronella oil*), merupakan komoditas bernilai tinggi yang banyak dimanfaatkan dalam industri parfum, kosmetik, farmasi, dan pangan karena kandungan komponen aromatiknya yang beragam [1],[2]. Komponen utama berupa citronellol dan geraniol yang dikenal sebagai rhodinol memiliki nilai ekonomi tinggi karena karakteristik aromatiknya menyerupai mawar sehingga banyak dimanfaatkan sebagai bahan baku dalam industri parfum, kosmetik, dan produk *fragrance* modern. Seiring meningkatnya permintaan terhadap produk berbasis bahan alami dan berkelanjutan, kebutuhan akan teknologi pemurnian rhodinol dengan kandungan relatif tinggi juga terus meningkat. Oleh karena itu, pengembangan teknologi pemurnian rhodinol yang efisien menjadi salah satu fokus penting dalam industri minyak atsiri [3].

Pemisahan rhodinol dari minyak sereh wangi masih menjadi tantangan teknis karena komponen penyusunnya, khususnya citronellol dan geraniol, memiliki titik didih yang berdekatan sehingga proses pemisahan dengan distilasi menjadi kurang efektif [4]. Selain itu, penggunaan suhu operasi tinggi pada proses distilasi dapat meningkatkan risiko perubahan atau degradasi komponen minyak atsiri yang bersifat sensitif terhadap panas. Oleh karena itu, penerapan kondisi vakum menjadi salah satu pendekatan untuk menurunkan temperatur didih dan mengurangi beban termal selama proses pemisahan [4],[5]. Distilasi fraksinasi vakum menjadi salah satu alternatif yang dapat digunakan karena penurunan tekanan operasi menyebabkan penurunan titik didih komponen, sehingga pemisahan dapat dilakukan pada temperatur yang lebih rendah dan berpotensi mengurangi degradasi termal [3],[6]. Kinerja proses distilasi multikomponen juga dipengaruhi oleh parameter operasi, antara lain tekanan, temperatur *reboiler*, dan rasio refluks, yang menentukan distribusi komponen serta kandungan relatif produk [7].

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengembangkan proses pemisahan komponen bernilai tinggi dari minyak sereh wangi melalui pendekatan eksperimental maupun pemodelan. Silvianti et al. [8] menunjukkan penerapan fraksinasi vakum minyak sereh wangi pada skala pilot untuk memperoleh fraksi kaya citronellal dan rhodinol. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa proses fraksinasi vakum dapat diterapkan pada skala pilot untuk memisahkan komponen utama minyak sereh wangi. Pada sisi pemodelan, Chen [9] menggunakan Aspen Plus untuk memodelkan proses pemisahan citronellol dan geraniol dari minyak sereh wangi pada kondisi vakum tinggi. Penelitian tersebut memanfaatkan data kesetimbangan uap cair dan menggunakan model DSTWU serta RadFrac untuk mengevaluasi dan mengoptimalkan kondisi pemisahan. Hasil penelitian tersebut menunjukkan potensi pemodelan proses dalam menentukan kondisi operasi pemisahan sebelum diterapkan pada proses aktual.

Selanjutnya, Widyasanti et al. [10] menerapkan pendekatan *response surface methodology* untuk mengoptimalkan proses distilasi fraksinasi vakum dalam meningkatkan konsentrasi α-guaiene pada minyak patchouli. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa pemodelan dan optimasi kondisi operasi dapat digunakan untuk mengevaluasi pengaruh parameter proses terhadap hasil pemisahan. Meskipun dilakukan pada minyak atsiri yang berbeda, pendekatan tersebut memberikan dasar metodologis bagi penerapan optimasi kondisi operasi pada proses distilasi fraksinasi vakum minyak sereh wangi. Kanza et al. [11] juga menunjukkan bahwa karakteristik proses distilasi vakum dapat berbeda antara skala laboratorium dan pilot. Selain penelitian yang secara khusus membahas minyak sereh wangi, pendekatan integrasi pemodelan dan evaluasi eksperimental telah diterapkan pada proses fraksinasi minyak atsiri lainnya. Do et al. [12] mengembangkan model proses *vacuum batch rectification* untuk fraksinasi minyak atsiri kayu manis dan melakukan evaluasi model menggunakan data eksperimen. Model yang telah dievaluasi kemudian digunakan untuk mengevaluasi kondisi operasi dan analisis *scale-up*. Pendekatan tersebut menunjukkan pentingnya evaluasi eksperimental dalam mengevaluasi kemampuan model dalam merepresentasikan proses aktual.

Selain itu, Do et al. [13] menerapkan distilasi fraksinasi vakum pada minyak sereh (*Cymbopogon citratus*) untuk memperoleh fraksi dengan komposisi komponen yang berbeda. Meskipun menggunakan jenis minyak sereh yang berbeda, penelitian tersebut relevan sebagai pembanding dalam penerapan distilasi fraksinasi vakum pada minyak atsiri genus *Cymbopogon*. Penelitian mengenai pemodelan dan evaluasi proses fraksinasi minyak atsiri juga menunjukkan bahwa evaluasi terhadap data eksperimen diperlukan sebelum model digunakan untuk merepresentasikan kondisi proses aktual [12]. Namun, masih terdapat kebutuhan untuk mengintegrasikan komposisi aktual bahan baku minyak sereh wangi, pemodelan proses menggunakan Aspen HYSYS, penerapan kondisi operasi hasil pemodelan pada unit distilasi fraksinasi vakum skala pilot, serta evaluasi kuantitatif terhadap perbedaan antara hasil pemodelan dan proses aktual.

Penelitian ini bertujuan memodelkan dan mengevaluasi proses distilasi fraksinasi vakum berbasis perangkat lunak Aspen HYSYS untuk memprediksi kandungan relatif rhodinol dari minyak sereh wangi pada skala pilot. Model dikembangkan berdasarkan karakteristik dan komposisi aktual bahan baku, kemudian digunakan untuk mengevaluasi pengaruh tekanan vakum, temperatur *reboiler*, dan rasio refluks terhadap kandungan relatif rhodinol. Kondisi operasi hasil pemodelan selanjutnya diterapkan pada unit distilasi fraksinasi vakum

skala pilot melalui tiga percobaan, dan hasilnya dibandingkan dengan prediksi pemodelan menggunakan perhitungan persentase kesalahan. Pendekatan ini digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian model Aspen HYSYS dalam merepresentasikan proses aktual sekaligus mengidentifikasi keterbatasan model yang perlu diperhatikan dalam penerapan pemodelan pada proses fraksinasi vakum minyak sereh wangi.

2 Metode

Penelitian ini dilakukan melalui lima tahapan utama, yaitu (1) karakterisasi bahan baku minyak sereh wangi, (2) pengembangan model proses menggunakan perangkat lunak Aspen HYSYS V12, (3) pelaksanaan distilasi fraksinasi vakum pada unit skala pilot, (4) analisis komposisi dan sifat fisikokimia produk, serta (5) evaluasi model berdasarkan perbandingan hasil pemodelan dengan hasil eksperimen. Alur penelitian dirancang untuk menghubungkan karakteristik aktual bahan baku dengan model proses dan kondisi operasi pada unit pilot. Karakterisasi bahan baku dilakukan untuk memperoleh komposisi komponen dan sifat fisikokimia yang digunakan sebagai dasar penyusunan umpan pemodelan. Model proses kemudian dikembangkan dalam Aspen HYSYS V12 menggunakan komponen penyusun utama minyak sereh wangi dan kondisi operasi yang disesuaikan dengan unit distilasi skala pilot. Pemodelan dilakukan dengan memvariasikan tekanan operasi, suhu *reboiler*, dan rasio refluks. Kondisi operasi hasil pemodelan selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam tiga percobaan distilasi fraksinasi vakum pada skala pilot. Produk setiap percobaan dianalisis menggunakan GCMS untuk menentukan kandungan relatif citronellol dan geraniol sebagai komponen utama rhodinol. Kesesuaian model dievaluasi dengan membandingkan kandungan relatif rhodinol hasil pemodelan dan eksperimen menggunakan persentase kesalahan.

2.1 Persiapan Alat dan Bahan

Bahan baku yang digunakan berupa minyak sereh wangi (*citronella oil*) jenis *Cymbopogon nardus* (lenabatu/aster) yang diperoleh dari salah satu penyuling minyak atsiri di Kabupaten Subang, Jawa Barat. Bahan pendukung meliputi alkohol teknis untuk pengujian kelarutan, aquades untuk pengujian densitas, dan kertas saring untuk penyaringan sampel sebelum analisis. Proses pemisahan dilakukan menggunakan unit distilasi fraksinasi vakum skala pilot berkapasitas 50 kg. Unit terdiri atas tangki *reboiler*, kolom fraksinasi, kondensor, sistem refluks, dan sistem vakum. Sistem vakum digunakan untuk mempertahankan tekanan operasi sekitar 26 mbar. Unit dilengkapi sensor temperatur pada bagian *heater*, bahan baku / *reboiler*, dan uap untuk pemantauan kondisi proses. Tekanan operasi dipantau menggunakan *vacuum gauge*. Pemodelan proses dilakukan menggunakan perangkat lunak Aspen HYSYS V12. Analisis komposisi bahan baku dan produk dilakukan menggunakan *Gas Chromatography Mass Spectrometry* (GCMS) Shimadzu QP2010 Ultra dengan kolom kapiler Rxi-5MS. Parameter fisikokimia yang dianalisis meliputi warna, bobot jenis, indeks bias, putaran optik, dan kelarutan dalam alkohol. Bobot jenis ditentukan menggunakan piknometer, indeks bias menggunakan refraktometer, dan putaran optik menggunakan polarimeter pada suhu ruang. Pengujian sifat fisikokimia mengacu pada ISO 3849-1981 untuk minyak sereh wangi dan SNI 06-0027-1987 untuk produk geraniol / rhodinol.

2.2 Pengembangan Model Proses Aspen HYSYS

Simulasi proses menggunakan Aspen HYSYS diawali dengan membuat *New Case* sebagai kasus simulasi baru. Tahap berikutnya adalah menentukan *fluid package* yang sesuai dengan karakteristik komponen yang digunakan dalam proses. Komponen yang belum tersedia pada pustaka (*library)* Aspen HYSYS didefinisikan sebagai *hypothetical component*s dengan memasukkan parameter fisik yang meliputi luas area, berat molekul, titik didih normal, densitas, temperatur kritis, tekanan kritis, dan volume kritis [14]. Komponen utama penyusun minyak serai wangi (*citronella oil*) yang digunakan dalam simulasi meliputi *limonene, citronellal, citronellol, geraniol, geraniol asetat, caryophyllene, dan cadinene*. Setelah seluruh komponen dan parameter terkait didefinisikan, model dilanjutkan dengan memasuki *simulation environment*. Pada tahap ini *stream* dan *distillation column* dipilih melalui *model palette* untuk membangun konfigurasi proses distilasi. Kondisi operasi kemudian ditetapkan dengan tekanan 26 mbar pada bagian atas kolom (kondensor) dan 26 mbar pada bagian bawah kolom (*reboiler*), sedangkan rasio refluks divariasikan pada nilai 2:1, 4:1, dan 6:1. Umpan pemodelan ditetapkan sebesar 50 kg untuk merepresentasikan kapasitas operasi unit pilot. Pada model, komponen dengan volatilitas relatif lebih tinggi, terutama limonene dan citronellal, dipisahkan terlebih dahulu sebagai fraksi ringan, sedangkan citronellol dan geraniol diarahkan sebagai komponen utama fraksi rhodinol. Setiap skenario model dijalankan hingga mencapai kondisi konvergen. Apabila konvergensi belum tercapai, parameter operasi dan konfigurasi proses disesuaikan, kemudian model dijalankan kembali hingga diperoleh kondisi operasi yang konvergen dan hasil simulasi yang dapat digunakan untuk analisis. Data parameter komponen hipotetik yang digunakan dalam pemodelan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter komponen hipotetik yang digunakan dalam pemodelan

No	Nama komponen	Luas (%)	Berat molekul (g/mol)	Titik didih normal (K)	Densitas (g/cm³)	Temperatur uji (K)	Tekanan uji (kPa)	Volume molar (m³/kg.mol)
1	Limonene	8,28	136,23	450	0,841	298,15	101,325	0,16199
2	Citronellal	9,14	154,25	481	0,855	298,15	101,325	0,18041
3	Citronellol	5,850	156,27	498	0,855	298,15	101,325	0,18277
4	Geraniol	45,52	154,25	503	0,889	298,15	101,325	0,17351
5	Geraniol asetat	9,45	196,29	515,15	0,916	298,15	101,325	0,21429
6	Caryophyllene	7,36	204,35	529,15	0,901	298,15	101,325	0,22680
7	Cadinene	14,40	204,35	551,15	0,916	298,15	101,325	0,22309

2.3 Proses Distilasi Fraksinasi Vakum Skala Pilot

Eksperimen dilakukan menggunakan unit distilasi fraksinasi vakum berkapasitas 50 kg dengan tiga kali percobaan. Pada setiap percobaan digunakan 50 kg minyak sereh wangi sebagai bahan baku. Kondisi operasi awal ditentukan berdasarkan hasil pemodelan Aspen HYSYS, meliputi tekanan vakum, suhu *reboiler*, dan rasio refluks. Sistem vakum dioperasikan pada tekanan 26 mbar. Tekanan dipantau secara kontinu menggunakan *vacuum gauge* selama proses berlangsung. Pemanasan bahan baku dilakukan menggunakan heater pada tangki *reboiler*. Suhu *reboiler*, dan suhu uap dipantau menggunakan sensor temperatur yang tersedia pada unit. Rasio refluks ditentukan sebagai perbandingan jumlah kondensat yang dikembalikan ke kolom terhadap jumlah kondensat yang diambil sebagai distilat. Pengaturan rasio refluks dilakukan menggunakan *valve* pada jalur refluks. Kondisi operasi pada masing-masing percobaan disesuaikan berdasarkan hasil pemodelan dan evaluasi percobaan sebelumnya.

Pada tahap awal proses, fraksi yang lebih volatil dipisahkan terlebih dahulu. Pengambilan fraksi dilakukan berdasarkan perubahan kondisi temperatur uap dan karakteristik fraksi yang dihasilkan. Sampel dari fraksi yang diperoleh dianalisis menggunakan GCMS untuk menentukan distribusi komponen. Fraksi rhodinol ditetapkan berdasarkan kandungan relatif citronellol dan geraniol sebagai komponen utama. Percobaan pertama dilakukan menggunakan kondisi pemodelan pertama, yaitu tekanan 26 mbar dan rasio refluks 2:1. Kondisi aktual yang tercatat selama proses kemudian digunakan sebagai data eksperimen untuk evaluasi model. Percobaan kedua dilakukan menggunakan kondisi pemodelan kedua, yaitu tekanan 26 mbar dan rasio refluks 4:1. Percobaan ketiga dilakukan menggunakan kondisi pemodelan ketiga, yaitu tekanan 26 mbar dan rasio refluks 6:1. Apabila kondisi operasi aktual berbeda dari kondisi yang ditetapkan dalam pemodelan, nilai aktual dicatat dan digunakan dalam analisis evaluasi. Perubahan kondisi antarpercobaan juga dicatat sebagai bagian dari evaluasi penerapan model pada unit pilot.

2.4 Analisa GCMS

Analisis *Gas Chromatography Mass Spectrometry* (GCMS) dilakukan untuk mengidentifikasi komponen penyusun minyak sereh wangi serta menentukan persentase relatif komponen pada setiap fraksi hasil distilasi. Analisis dilakukan di laboratorium pengujian di Kabupaten Subang menggunakan instrumen GCMS Shimadzu QP2010 Ultra yang dilengkapi kolom kapiler Rxi-5MS dengan panjang 30 m, diameter dalam 0,25 mm, dan ketebalan film 0,25 µm. Sebelum analisis, sampel minyak sereh wangi dan produk hasil distilasi disaring menggunakan kertas saring untuk menghilangkan partikel padatan, kemudian diencerkan menggunakan pelarut n-hexane dengan perbandingan tertentu agar sesuai dengan rentang deteksi instrumen. Volume injeksi sampel sebesar 1 µL dilakukan menggunakan mode *split injection.* Gas helium digunakan sebagai gas pembawa (*carrier gas*) dengan laju alir konstan. Program suhu oven GCMS dimulai pada suhu awal 60°C dan ditahan selama beberapa menit, kemudian dinaikkan secara bertahap hingga mencapai suhu akhir sekitar 250°C untuk memisahkan komponen berdasarkan volatilitasnya. Suhu *injector* dan detektor diatur sesuai kondisi operasi instrumen agar proses penguapan dan deteksi komponen berlangsung optimal. Identifikasi komponen dilakukan berdasarkan kesesuaian spektrum massa dengan pustaka data (*mass spectral library*) NIST 20 serta mempertimbangkan waktu retensi masing-masing komponen. Komponen utama yang dianalisis meliputi limonene, citronellal, citronellol, geraniol, geraniol asetat, caryophyllene, dan cadinene. Persentase area puncak (*peak area* %) dari kromatogram digunakan sebagai pendekatan komposisi relatif masing-masing komponen dalam sampel. Nilai area tersebut kemudian digunakan untuk menentukan kandungan relatif rhodinol, distribusi fraksi hasil distilasi, serta sebagai data input komposisi pada pemodelan Perangkat lunak Aspen HYSYS.

2.5 Pengujian Sifat Fisikokimia Produk

Produk rhodinol hasil distilasi dianalisis berdasarkan parameter fisikokimia yang meliputi warna, bobot jenis, indeks bias, putaran optik, dan kelarutan dalam alkohol. Pengujian dilakukan untuk memberikan informasi pendukung mengenai karakteristik produk hasil pemisahan. Bobot jenis ditentukan menggunakan piknometer, indeks bias menggunakan refraktometer, putaran optik menggunakan polarimeter, sedangkan kelarutan ditentukan menggunakan alkohol sesuai prosedur pengujian yang digunakan. Hasil pengujian dibandingkan dengan parameter mutu yang dirujuk dari SNI 06-0027-1987.

2.6 Evaluasi Model

Evaluasi proses dilakukan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian antara hasil pemodelan Perangkat lunak Aspen HYSYS dengan hasil aktual proses distilasi fraksinasi vakum pada skala pilot. Parameter yang dibandingkan adalah kandungan relatif rhodinol. Kandungan relatif rhodinol ditentukan berdasarkan persentase kandungan citronellol dan geraniol hasil analisis *Gas Chromatography Mass Spectrometry* (GCMS) pada fraksi produk [3], [4]. Nilai hasil pemodelan dibandingkan dengan hasil aktual menggunakan persentase *error* untuk mengevaluasi tingkat deviasi model pemodelan terhadap kondisi operasi actual [10], [12], [13]. Persentase *error* digunakan sebagai indikator kesesuaian antara hasil pemodelan dan data eksperimen, di mana semakin kecil nilai *error* menunjukkan semakin baik kemampuan model dalam merepresentasikan kondisi proses actual [12]. Pendekatan evaluasi melalui perbandingan hasil pemodelan dengan data eksperimen merupakan prosedur yang umum digunakan dalam evaluasi model pemodelan proses kimia, termasuk pada sistem distilasi, untuk menilai akurasi model sebelum digunakan sebagai dasar optimasi proses . Hasil evaluasi kemudian digunakan untuk mengevaluasi ketepatan parameter masukan pemodelan, seperti konfigurasi kolom, kondisi operasi, dan asumsi termodinamika yang digunakan dalam Aspen HYSYS [14].

Persentase *error* dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\%\ Error = \frac{Nilai\ Pemodelan - Nilai\ Eksperimen}{Nilai\ Eksperimen}\ x\ 100\% \quad (1)$$

3 Hasil dan Pembahasan

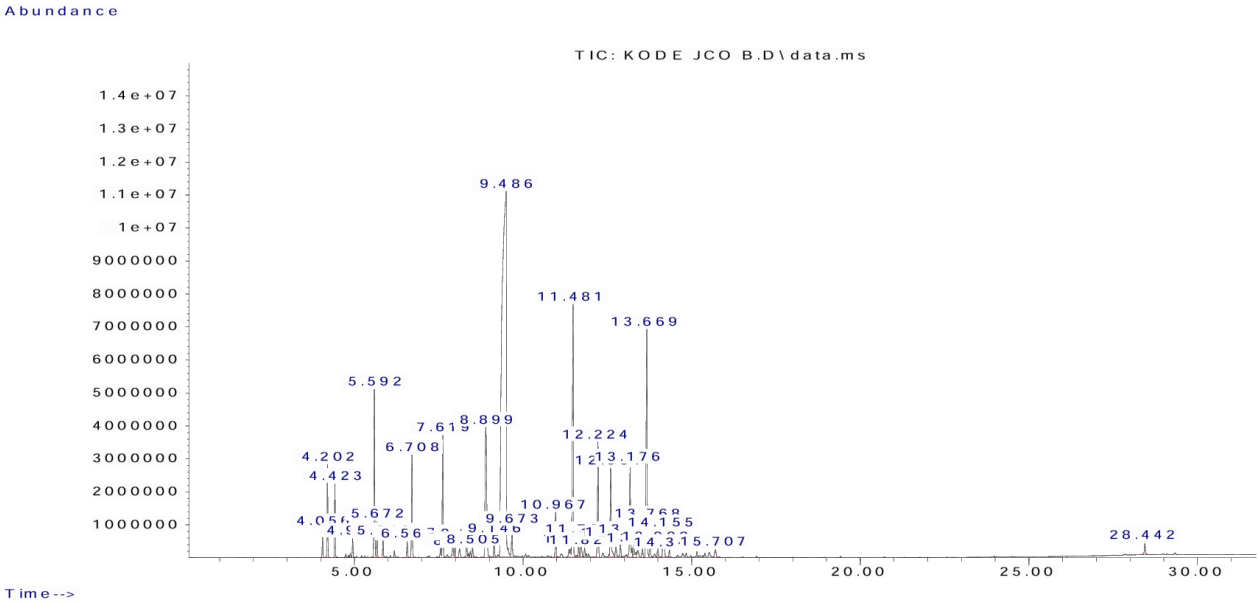
3.1 Karakteristik Bahan Baku Minyak Sereh Wangi

Tabel 2. Hasil karakterisasi bahan baku minyak sereh wangi.

No	Parameter	Bahan baku	ISO 3849-1981
1	Warna	Kuning cerah	Kuning pucat - kuning kecoklatan
2	Bobot jenis	0,897	0,894-0,91
3	Indeks bias	1,480	1,479-1,487
4	Putaran optik	-19,65	-22- -12
5	Kelarutan dalam alkohol	1:2	1:2

Karakteristik fisikokimia bahan baku minyak sereh wangi disajikan pada Tabel 2. Hasil pengujian menunjukkan bahwa bobot jenis sebesar 0,897, indeks bias 1,480, putaran optik −19,65, dan kelarutan dalam alkohol 1:2 masih berada dalam rentang yang dipersyaratkan oleh ISO 3849-1981. Warna bahan baku juga berada pada rentang karakteristik minyak sereh wangi yang dipersyaratkan. Dengan demikian, bahan baku yang digunakan memiliki karakteristik yang sesuai untuk digunakan pada proses pemisahan lebih lanjut. Gambar 1 menunjukkan kandungan dan jumlah komponen pada minyak sereh wangi aster menghasilkan 38 komponen. Dalam rangka penyederhanaan komponen minyak sereh wangi aster tersebut dikelompokan berdasarkan kedekatan titik didih tiap komponen menjadi tujuh kelompok komponen representatif seperti pada Tabel 3. Komposisi relatif masing-masing komponen kemudian digunakan sebagai data masukan (input composition) pada pemodelan Perangkat lunak Aspen HYSYS. Komponen citronellol dan geraniol merupakan komponen utama yang digunakan sebagai indikator kandungan rhodinol dalam penelitian ini. Berdasarkan komposisi tersebut, kandungan awal rhodinol yang dihitung dari citronellol dan geraniol adalah sekitar 51,37%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa bahan baku memiliki fraksi rhodinol yang cukup besar sehingga

proses distilasi fraksinasi vakum dapat digunakan untuk meningkatkan konsentrasi komponen tersebut. Perbedaan komponen yang terkandung pada minyak sereh wangi dapat disebabkan oleh perbedaan pada beberapa faktor seperti umur panen, proses ekstraksi, dan penyimpanan minyak sereh wangi[3]. Pengaruh umur panen terhadap hasil minyak sereh wangi telah dilaporkan sebelumnya, dengan kondisi optimum yang dipengaruhi oleh umur panen dan lama penyulingan[15]. Selain itu, proses ekstraksi yang tepat juga dapat meningkatkan kualitas minyak sereh wangi yang dihasilkan.



Gambar 1. Hasil kromatogram bahan baku

Tabel 3 Komponen representatif bahan baku minyak sereh wangi.

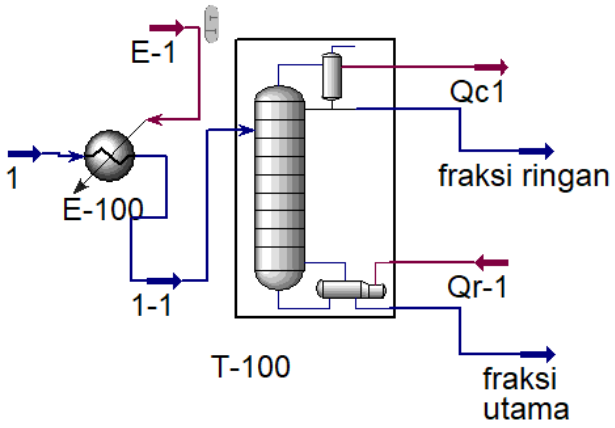
No	Komponen	Fraksi (%)
1	Limonene	8,28
2	Citronellal	9,14
3	Citronellol	5,85
4	Geraniol	45,52
5	Geraniol Asetat	9,45
6	Caryophyllene	7,36
7	Cadinene	14,40

3.2 Hasil Pemodelan Proses Aspen HYSYS

Simulasi proses dilakukan dengan membangun konfigurasi proses sesuai dengan kebutuhan sistem menggunakan fitur yang tersedia pada Aspen HYSYS. Konfigurasi tersebut meliputi aliran masuk (*input stream*), aliran keluar (*output stream*), unit kolom distilasi, pemanas, serta unit operasi pendukung lainnya. Tahap awal dilakukan dengan memilih *model palette* yang sesuai dengan konfigurasi proses yang akan disimulasikan. Pada simulasi distilasi fraksinasi vakum rhodinol, unit yang digunakan terdiri atas *material stream*, pemanas, dan kolom distilasi. Selanjutnya, komponen penyusun dan komposisi aliran *feed* ditetapkan berdasarkan hasil analisis GC. Minyak serai wangi (*citronella oil*) digunakan sebagai bahan *feed* dengan komposisi utama sebesar 8,28% limonene, 9,14% citronellal, 5,85% citronelol, 45,52% geraniol, 9,45% geranio asetat, 7,36% caryophyllene, dan 14,40% cadinene. Komposisi tersebut selanjutnya digunakan sebagai basis input pada aliran *feed* dalam simulasi Aspen HYSYS.

Pada proses distilasi fraksinasi vakum, umpan yang digunakan ditetapkan 50 kg minyak serai wangi. Komponen dengan volatilitas relatif lebih tinggi, terutama limonene dan citronellal, dipisahkan terlebih dahulu sebagai fraksi ringan, sedangkan citronellol dan geraniol diarahkan sebagai komponen utama fraksi rhodinol. Sebelum memasuki kolom distilasi, umpan terlebih dahulu dipanaskan menggunakan *pre-heater* untuk

meningkatkan temperatur hingga mendekati kondisi operasi. Tahap pemanasan awal ini bertujuan untuk mengurangi beban pemanasan pada *reboiler* dan mendukung kestabilan kondisi operasi kolom. Umpan yang telah dipanaskan selanjutnya dialirkan menuju kolom distilasi. Posisi umpan pada kolom ditentukan secara otomatis oleh simulator berdasarkan konfigurasi proses, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Pada skenario pertama, pemodelan dilakukan pada tekanan 26 mbar, suhu *reboiler* 102°C, dan rasio refluks 2:1. Kondisi tersebut menghasilkan kandungan relatif rhodinol sebesar 86%. Skenario kedua menggunakan tekanan 26 mbar, suhu *reboiler* 105°C, dan rasio refluks 4:1, sehingga kandungan relatif rhodinol yang sebesar 83,16%. Sementara itu, skenario ketiga menggunakan tekanan 26 mbar, suhu *reboiler* 115°C, dan rasio refluks 6:1 dengan kandungan relatif rhodinol sebesar 83,16%. Seluruh simulasi dilakukan dengan asumsi bahwa sistem beroperasi pada kondisi *steady-state* (tunak).



Gambar 2. Konfigurasi model proses.

Hasil pemodelan menunjukkan bahwa peningkatan rasio refluks tidak secara langsung menghasilkan peningkatan kandungan relatif rhodinol. Pada skenario pertama, rasio refluks 2:1 menghasilkan kandungan relatif prediksi paling tinggi, yaitu 86%, sedangkan peningkatan rasio refluks menjadi 4:1 dan 6:1 menghasilkan kandungan relatif sekitar 83,16%. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa hubungan antara rasio refluks dan kandungan relatif pada sistem multikomponen tidak selalu linier. Rasio refluks yang lebih tinggi meningkatkan kontak antara fase uap dan cair, tetapi perubahan kondisi operasi secara simultan, khususnya suhu *reboiler* dan tekanan, dapat mengubah distribusi komponen di sepanjang kolom. Dalam konteks penelitian ini, hasil pemodelan tidak hanya digunakan untuk memperoleh nilai kandungan relatif teoritis, tetapi juga sebagai acuan penentuan kondisi operasi pada unit distilasi skala pilot. Pendekatan tersebut penting karena proses pemisahan minyak atsiri merupakan sistem multikomponen dengan karakteristik volatilitas yang berbeda. Penelitian terdahulu mengenai optimasi proses distilasi fraksinasi vakum pada minyak atsiri menunjukkan bahwa pemodelan dan optimasi kondisi operasi dapat digunakan untuk mengevaluasi pengaruh parameter proses terhadap hasil pemisahan[10]. Dengan demikian, hasil pemodelan pada penelitian ini berfungsi sebagai *process prediction* yang selanjutnya diuji melalui percobaan skala pilot.

Tabel 4. Skenario pemodelan proses untuk mengevaluasi kandungan relatif rhodinol.

Pemodelan percobaan	Tekanan (mbar)	Suhu *reboiler* (°C)	Refluks	Kandungan relatif rhodinol (%)
Pertama	26	102	2:1	86
Kedua	26	105	4:1	83,16
Ketiga	26	115	6:1	83,16

3.3 Hasil Distilasi Fraksinasi Vakum Skala Pilot

Hasil pelaksanaan distilasi fraksinasi vakum pada unit skala pilot disajikan pada Tabel 5. Ketiga percobaan menggunakan umpan minyak sereh wangi sebesar 50 kg. Kondisi aktual menunjukkan bahwa tekanan operasi berada sekitar 26 mbar, sedangkan suhu *reboiler* mengalami perbedaan terhadap kondisi yang dirancang melalui pemodelan. Pada percobaan pertama, kondisi yang dirancang melalui pemodelan adalah tekanan 26 mbar, suhu *reboiler* 102°C, dan rasio refluks 2:1. Pada kondisi aktual, tekanan tercatat sebesar 26 mbar dan suhu *reboiler* mencapai 120°C. Produk yang diperoleh memiliki kandungan relatif rhodinol sebesar 60,22%. Pada percobaan kedua, kondisi pemodelan menggunakan tekanan 26 mbar, suhu 105°C, dan rasio refluks 4:1, sedangkan kondisi aktual mencapai tekanan 26 mbar dan suhu *reboiler* 116°C.

Kandungan relatif rhodinol yang diperoleh meningkat menjadi 65,08%. Percobaan ketiga menggunakan kondisi pemodelan 26 mbar, suhu *reboiler* 115°C, dan rasio refluks 6:1. Pada kondisi aktual, tekanan berada pada 26 mbar dan suhu *reboiler* mencapai 134°C. Percobaan tersebut menghasilkan kandungan relatif rhodinol sebesar 66,51%, yang merupakan nilai tertinggi dari tiga percobaan. Peningkatan kandungan relatif dari 60,22% menjadi 66,51% menunjukkan bahwa perubahan kondisi operasi memberikan pengaruh terhadap komposisi fraksi hasil distilasi. Salah satu parameter penting adalah rasio refluks. Peningkatan rasio refluks menyebabkan sebagian kondensat dikembalikan ke dalam kolom sehingga meningkatkan kontak antara fase cair dan uap. Kondisi tersebut secara teoritis dapat meningkatkan perpindahan massa dan memperbaiki pemisahan komponen dengan volatilitas berbeda [5]. Pada penelitian ini, perubahan kondisi operasi secara simultan dari percobaan pertama hingga ketiga menghasilkan peningkatan kandungan relatif rhodinol dari 60,22% menjadi 66,51%. Peningkatan tersebut tidak dapat diatribusikan secara individual terhadap rasio refluks, karena suhu *reboiler* dan tekanan operasi juga mengalami perubahan.

Meskipun demikian, peningkatan kandungan relatif tersebut tidak dapat dikaitkan hanya dengan rasio refluks. Kondisi aktual ketiga percobaan menunjukkan adanya perubahan suhu *reboiler*, yaitu 120, 116, dan 134°C, sementara tekanan aktual relatif berada pada sekitar 26 mbar. Selain itu, pada percobaan ketiga telah dilakukan perbaikan pada sensor temperatur heater dan uap sehingga pembacaan temperatur menjadi lebih akurat. Oleh karena itu, peningkatan kandungan relatif pada percobaan ketiga merupakan hasil interaksi antara kondisi operasi dan perbaikan pengukuran proses, bukan semata-mata akibat peningkatan rasio refluks. Hasil tersebut juga memperlihatkan adanya perbedaan antara kondisi operasi yang diprediksi oleh Aspen HYSYS dan kondisi yang dapat direalisasikan pada unit pilot. Perbedaan suhu *reboiler* aktual terhadap kondisi pemodelan menunjukkan bahwa kemampuan sistem pemanasan dan instrumentasi merupakan faktor penting dalam penerapan hasil pemodelan pada skala pilot. Hal ini menjadi salah satu aspek penting dalam interpretasi hasil evaluasi model. Hasil penelitian sebelumnya mengenai pemurnian fraksi kaya rhodinol menggunakan distilasi juga menunjukkan bahwa proses fraksinasi dapat digunakan untuk meningkatkan konsentrasi komponen rhodinol dari minyak sereh wangi [3]. Penelitian mengenai distilasi vakum minyak sereh wangi pada skala pilot juga menunjukkan pentingnya kondisi operasi aktual dalam proses pemisahan [11]. Hasil penelitian ini melengkapi penelitian tersebut dengan menghubungkan prediksi Aspen HYSYS dengan hasil aktual pada unit distilasi skala pilot.

Tabel 5. Kondisi aktual proses distilasi fraksinasi vakum minyak sereh wangi.

Percobaan	Tekanan (mbar)	Suhu bahan *reboiler* (°C)	Refluks	Kandungan relatif rhodinol (%)
Pertama	26	120	2:1	60,22
Kedua	26	116	4:1	65,08
Ketiga	26	134	6:1	66,51

3.4 Karakteristik Produk Rhodinol

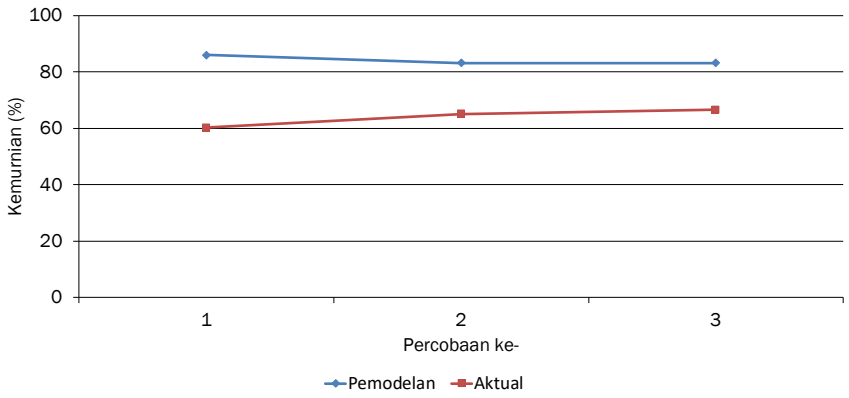
Karakteristik fisikokimia produk rhodinol dari percobaan ketiga disajikan pada Tabel 6. Produk memiliki warna bening, bobot jenis 0,881, indeks bias 1,554, putaran optik −5,1, dan kelarutan dalam alkohol 1:1. Berdasarkan parameter yang digunakan sebagai pembanding, bobot jenis dan putaran optik berada dalam rentang yang dirujuk. Bobot jenis produk sebesar 0,881 menunjukkan adanya perubahan karakteristik fisik dibandingkan bahan baku yang memiliki bobot jenis 0,897. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa proses fraksinasi menghasilkan fraksi dengan komposisi yang berbeda dari bahan baku awal. Indeks bias produk tercatat sebesar 1,554. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan indeks bias bahan baku sebesar 1,480. Perubahan indeks bias menunjukkan bahwa komposisi komponen dalam fraksi produk telah berubah setelah proses pemisahan. Namun, indeks bias tidak dapat digunakan sebagai indikator tunggal untuk menentukan kandungan relatif rhodinol karena nilai tersebut dipengaruhi oleh komposisi keseluruhan campuran. Oleh karena itu, penentuan kandungan relatif rhodinol pada penelitian ini didasarkan pada hasil GCMS, dengan citronellol dan geraniol digunakan sebagai komponen indikator. Hasil GCMS pada produk percobaan ketiga menunjukkan bahwa kandungan rhodinol mencapai 66,51%. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan kandungan rhodinol bahan baku yang dihitung dari citronellol dan geraniol, yaitu sekitar 51,37%. Dengan demikian, proses distilasi fraksinasi vakum menghasilkan peningkatan konsentrasi relatif komponen rhodinol dibandingkan bahan baku awal. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa proses fraksinasi berhasil memperkaya komponen target, meskipun produk yang diperoleh belum dapat dikategorikan sebagai rhodinol dengan kandungan relatif sangat tinggi. Hasil ini juga menjadi dasar penting dalam mengevaluasi kemampuan model Aspen HYSYS dalam memprediksi performa proses pada kondisi aktual.

Tabel 6. Hasil produk rhodinol pada percobaan ketiga.

No	Parameter	Hasil
1	Warna	Bening
2	Bobot Jenis	0,881
3	Indeks Bias	1,554
4	Putaran Optik	-5,1
5	Kelarutan dalam Alkohol	1:1

3.5 Evaluasi Model Aspen HYSYS terhadap Hasil Eksperimental

Evaluasi dilakukan dengan membandingkan nilai kandungan relatif rhodinol hasil pemodelan dengan hasil eksperimen pada tiga kondisi operasi. Parameter evaluasi dipilih berupa kandungan relatif rhodinol karena parameter tersebut merupakan keluaran utama model sekaligus parameter yang dapat diperoleh secara langsung melalui analisis GCMS. Gambar 3 memperlihatkan hasil perbandingan menunjukkan bahwa Aspen HYSYS memprediksi kandungan relatif rhodinol sebesar 86% pada percobaan pertama, sedangkan hasil aktual sebesar 60,22%. Pada percobaan kedua, nilai pemodelan sebesar 83,16% dibandingkan dengan nilai aktual 65,08%. Pada percobaan ketiga, pemodelan menghasilkan sekitar 83,16%, sedangkan hasil aktual mencapai 66,51%. Nilai kesalahan masing-masing adalah 42,80%, 27,78%, dan 25,01%.



Gambar 3. Perbandingan hasil pemodelan dan hasil aktual

Perbandingan tersebut menunjukkan bahwa model secara konsisten memprediksi kandungan relatif yang lebih tinggi daripada hasil eksperimen. Selisih antara prediksi dan hasil aktual juga cenderung mengecil pada percobaan kedua dan ketiga. Nilai *error* menurun dari 42,80% pada percobaan pertama menjadi 27,78% pada percobaan kedua dan 25,01% pada percobaan ketiga. Penurunan tersebut menunjukkan peningkatan kesesuaian relatif model terhadap hasil eksperimen pada rangkaian pengujian, tetapi tidak dapat diatribusikan secara individual terhadap peningkatan rasio refluks karena suhu *reboiler* dan kondisi tekanan juga berubah. Perbedaan antara hasil pemodelan dan eksperimen dapat dijelaskan dari beberapa aspek. Pertama, kondisi operasi aktual tidak sepenuhnya sama dengan kondisi yang digunakan dalam pemodelan. Sebagai contoh, pada percobaan pertama pemodelan menggunakan suhu *reboiler* 102°C dan tekanan 26 mbar, sedangkan kondisi aktual mencapai 120°C dan 26 mbar. Perbedaan kondisi tersebut dapat mengubah distribusi volatilitas dan komposisi komponen sepanjang kolom.

Kedua, model Aspen HYSYS menggunakan penyederhanaan komponen dengan mengelompokkan sejumlah komponen minyak sereh wangi menjadi tujuh komponen utama. Penyederhanaan ini diperlukan untuk membangun model, tetapi dapat menyebabkan karakteristik kesetimbangan uap-cair campuran aktual tidak seluruhnya terwakili. Selain itu, penggunaan komponen hipotetik dalam pemodelan menyebabkan akurasi prediksi bergantung pada ketepatan parameter fisik yang dimasukkan ke dalam model. Ketiga, kondisi unit pilot berbeda dengan kondisi ideal pada pemodelan. Fluktuasi tekanan vakum, perubahan temperatur selama proses, keterbatasan sistem pengukuran, serta pengaturan refluks secara manual dapat menyebabkan kondisi operasi aktual berfluktuasi. Faktor-faktor tersebut tidak sepenuhnya direpresentasikan dalam model *steady-state*.

Secara keseluruhan, hasil evaluasi menunjukkan bahwa Aspen HYSYS telah mampu memberikan gambaran awal mengenai kecenderungan proses pemisahan, tetapi model belum dapat digunakan secara langsung sebagai prediktor kuantitatif kondisi pilot tanpa penyesuaian lebih lanjut. Temuan ini penting karena tujuan

penelitian bukan hanya memperoleh nilai kandungan relatif hasil pemodelan, tetapi juga mengevaluasi sejauh mana model proses dapat merepresentasikan proses distilasi fraksinasi vakum pada skala pilot. Hasil penelitian ini memiliki keterkaitan dengan studi terdahulu mengenai pemodelan proses distilasi rhodinol menggunakan perangkat lunak proses. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa pemodelan dapat digunakan untuk mengevaluasi rancangan dan kondisi operasi proses distilasi vakum rhodinol [10]. Sementara itu, penelitian mengenai pemisahan citronellal dan geraniol menggunakan distilasi vakum menunjukkan bahwa perubahan kondisi operasi dapat memengaruhi efektivitas pemisahan komponen minyak sereh wangi [4]. Penelitian mengenai pemodelan kolom *rectification* citronellol–geraniol menggunakan Aspen Plus juga menunjukkan bahwa pemodelan berbasis pemodelan dapat digunakan untuk menganalisis perilaku pemisahan komponen tersebut [9].

Dengan demikian, kontribusi penelitian ini terletak pada pengujian hasil pemodelan Aspen HYSYS terhadap data eksperimental dari unit distilasi fraksinasi vakum skala pilot. Hasil evaluasi menunjukkan adanya deviasi yang perlu diperhitungkan ketika hasil pemodelan diterapkan pada kondisi nyata. Model selanjutnya dapat dikembangkan dengan memasukkan parameter peralatan dan kondisi operasi aktual secara lebih rinci, terutama karakteristik kolom, perilaku tekanan vakum, profil temperatur, kondisi kesetimbangan komponen, serta karakteristik sistem pemanasan dan refluks.

4 Kesimpulan

Penelitian ini telah melakukan pemodelan dan evaluasi kesesuaian hasil pemodelan proses distilasi fraksinasi vakum HYSYS untuk pemurnian rhodinol dari minyak sereh wangi menggunakan perangkat lunak Aspen HYSYS dan unit distilasi skala pilot. Hasil pemodelan menunjukkan Perbedaan kondisi tekanan, suhu *reboiler*, dan rasio refluks pada skenario pemodelan menghasilkan perbedaan prediksi kandungan relatif rhodinol. Dari tiga skenario pemodelan, kondisi 26 mbar, suhu *reboiler* 102°C, dan rasio refluks 2:1 menghasilkan kandungan relatif rhodinol tertinggi secara pemodelan sebesar 86%. Pada pengujian skala pilot, kondisi operasi dengan rasio refluks 6:1 menghasilkan kandungan relatif rhodinol tertinggi sebesar 66,51%, meningkat dibandingkan percobaan pertama sebesar 60,22% dan percobaan kedua sebesar 65,08%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi kondisi operasi yang diuji menghasilkan peningkatan kandungan relatif rhodinol dari 60,22% menjadi 66,51%, meskipun pengaruh individual setiap parameter belum dapat dipisahkan.

Evaluasi terhadap hasil eksperimen menunjukkan bahwa Aspen HYSYS secara konsisten memprediksi kandungan relatif lebih tinggi dibandingkan hasil aktual, dengan nilai *error* sebesar 42,80% pada percobaan pertama, 27,78% pada percobaan kedua, dan 25,01% pada percobaan ketiga. Penurunan *error* dari 42,80% menjadi 25,01% menunjukkan adanya peningkatan kesesuaian model terhadap kondisi eksperimen pada rangkaian pengujian yang dilakukan, tetapi model masih memiliki deviasi yang perlu diperhatikan untuk prediksi kuantitatif pada skala pilot. Secara teknis, kontribusi penelitian ini adalah menunjukkan penggunaan Aspen HYSYS sebagai pendekatan pemodelan untuk mengevaluasi proses distilasi fraksinasi vakum rhodinol sekaligus menguji keterwakilan model terhadap kondisi operasi skala pilot. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan model pada skala pilot memerlukan representasi parameter proses dan peralatan yang lebih detail, khususnya profil temperatur, kestabilan tekanan vakum, karakteristik kolom, serta kondisi sistem refluks dan pemanasan, sehingga akurasi prediksi dapat ditingkatkan pada pengembangan model selanjutnya.

Referensi

[1] F. Chemat, M. Abert-Vian, and G. Cravotto, “Green extraction of natural products: Concept and principles,” *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 13, no. 7, pp. 8615–8627, 2012. https://doi.org/10.3390/ijms13078615.

[2] R. S. Verma, S. K. Verma, S. Tandon, R. C. Padalia, and M. P. Darokar, “Chemical composition and antimicrobial activity of Java citronella (Cymbopogon winterianus Jowitt ex Bor) essential oil extracted by different methods,” *J. Essent. Oil Res.*, vol. 32, no. 5, pp. 449–455, 2020. https://doi.org/10.1080/10412905.2020.1787885

[3] A. N. Fitrah, M. S. Rusli, D. Setyaningsih, A. Riyanto, and N. Hidayati, “Proses pemurnian fraksi kaya rhodinol minyak sereh wangi menggunakan *spinning band distillation*,” *J. Teknol. Ind. Pertan.*, vol. 30, no. 2, pp. 128–137, 2020. https://doi.org/10.24961/j.tek.ind.pert.2020.30.2.128

[4] M.-T. Le, D.-P. Vu, T. N. Nguyen, and X.-T. Le, “Isolation of citronellal and geraniol from citronella (Cymbopogon winterianus) oil by vacuum fractional distillation: Effect of operating conditions on the separation,” *Pol. J. Chem. Technol.*, vol. 25, no. 4, pp. 67–80, 2023. https://doi.org/10.2478/pjct-2023-0040

[5] S. C. Beneti, E. Rosset, M. L. Corazza, C. D. Frizzo, M. Di Luccio, and J. V. Oliveira, "Fractionation of citronella (Cymbopogon winterianus) essential oil and concentrated orange oil phase by batch vacuum distillation," *J. Food Eng.*, vol. 102, no. 4, pp. 348–354, 2011. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.09.011

[6] W. P. Silvestre, F. R. Medeiros, F. Agostini, D. Toss, and G. F. Pauletti, "Fractionation of rosemary (Rosmarinus officinalis L.) essential oil using vacuum fractional distillation," *J. Food Sci. Technol.*, vol. 56, no. 12, pp. 5422–5434, 2019. https://doi.org/10.1007/s13197-019-04013-z

[7] Z. Jiang, M. Tawarmalani, and R. Agrawal, "Minimum reflux calculation for multicomponent distillation in multi-feed, multi-product columns : Mathematical model," *AIChE J.*, vol. 68, no. 12, Art. no. e17929, 2022. https://doi.org/10.1002/aic.17929

[8] R. Silvianti, Warsito, and C. Cahyani, "Separation process of citronellal and rhodinol from citronella oil using vacuum fractionations at pilot plant scale," in *Proc. 2nd Int. Conf. Essential Oils (ICEO 2019)*, pp. 91–95, 2019. https://doi.org/10.5220/0009957300910095

[9] Q. Chen and L. Feng, "Simulation study of citronellol-geraniol rectification tower based on Aspen Plus software," in *MATEC Web Conf.*, vol. 267, Art. no. 02008, 2019. https://doi.org/10.1051/matecconf/201926702008

[10] A. Widyasanti, S. Nurjanah, B. Nurhadi, and C. P. Osman, "Optimization of the vacuum fractional distillation process for enhancing the α-guaiene of patchouli oil with response surface methodology," *Separations*, vol. 10, no. 9, Art. no. 469, 2023. https://doi.org/10.3390/separations10090469

[11] S. Kanza, R. Silvianti, D. S. Ramadhan, M. Cahayo, and Sukardi, "Comparison of the separation process of crude citronella oil using vacuum fractionation distillation on a pilot plant scale and laboratory scale," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 733, no. 1, Art. no. 012013, 2021. https://doi.org/10.1088/1755-1315/733/1/012013

[12] X. T. Do, T. H. T. Nguyen, and N. T. Pham, "Experimental study and process modeling of vacuum batch rectification column for cinnamon essential oil fractionation," *Food Bioprod. Process.*, vol. 148, pp. 400–409, 2024. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.10.009

[13] D. N. Do, D. P. Nguyen, V.-D. Phung, X.-T. Le, T. M. Le, V. M. Do, B. Q. Minh, and X. C. Luu, "Fractionating of lemongrass (Cymbopogon citratus) essential oil by vacuum fractional distillation," *Processes*, vol. 9, no. 4, Art. no. 593, 2021. https://doi.org/10.3390/pr9040593

[14] J. Gmehling, M. Kleiber, B. Kolbe, and J. Rarey, *Chemical Thermodynamics for Process Simulation*, 2nd ed. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2019.

[15] M. Y. Khusna and P. Syarif, "Pengaruh umur panen dan lama penyulingan terhadap hasil minyak atsiri sereh wangi (Cymbopogon nardus L.)," *Biofarm: J. Ilm. Pertan.*, vol. 14, no. 2, 2018. https://doi.org/10.31941/biofarm.v14i2.795