

OPTIMASI *YIELD* KALSIUM SULFAT PADA PROSES DEKALSIFIKASI *CANE MOLASSES* MELALUI SIMULASI REAKTOR STOIKIOMETRI CHEMCAD

Alfi Choirunnisa¹, Profiyanti Hermien Suharti¹, Ibadul Wasi'an Nazar²

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

²PT Ajinomoto Indonesia Mojokerto *Factory*, Jl. Raya Mlirip No. 110, Mlirip, Kec. Jetis, Mojokerto
Jawa Timur 651352, Indonesia

alfichoironnisa201@gmail.com; profiyanti@polinema.ac.id

ABSTRAK

PT Ajinomoto Indonesia Mojokerto *Factory* melakukan proses dekalsifikasi untuk menghilangkan kandungan kalsium sebagai pengotor dalam bahan baku *cane molasses*, dengan menghasilkan kalsium sulfat (CaSO_4) sebagai produk samping melalui reaksi *irreversible* menggunakan asam sulfat (H_2SO_4). Penelitian ini bertujuan melakukan simulasi untuk menentukan kombinasi optimum konsentrasi H_2SO_4 , rasio massa H_2SO_4 terhadap *cane molasses*, dan kadar kalsium awal dalam *cane molasses* yang menghasilkan *yield* kalsium sulfat maksimum. Sebelum dilakukan simulasi proses, ketiga variabel tersebut dianalisis menggunakan perangkat lunak Minitab melalui pendekatan *Design of Experiment* (DOE) dengan metode *Central Composite Design* (CCD) pada lima level masing-masing variabel, untuk mengidentifikasi kombinasi paling berpengaruh terhadap reaksi. Titik optimum diperoleh pada konsentrasi H_2SO_4 sebesar 95%, rasio massa H_2SO_4 sebesar 10% terhadap massa *cane molasses*, dan kadar kalsium sebesar 8,3% terhadap massa *cane molasses* dengan *yield* teoritis sebesar 99,6013%. Hasil simulasi aktual di ChemCAD menunjukkan *yield* sebesar 80,10%, mengindikasikan perlunya validasi eksperimental terhadap model statistik guna memastikan kesesuaian proses terhadap kondisi riil industri.

Kata kunci: asam sulfat (H_2SO_4), CCD, *Design of Experiment*, kadar kalsium, reaksi *irreversible*

ABSTRACT

PT Ajinomoto Indonesia Mojokerto *Factory* conducts a decalcification process to remove calcium content as an impurity in *cane molasses* raw materials, by producing calcium sulfate (CaSO_4) as a by-product through an *irreversible* reaction using sulfuric acid (H_2SO_4). This study aims to perform simulation to determine the optimal combination of H_2SO_4 concentration, H_2SO_4 -to-*cane molasses* mass ratio, and initial calcium content in *cane molasses* that maximizes calcium sulfate yield. Prior to process simulation, the three variables were analyzed using Minitab software through a *Design of Experiment* (DOE) approach with the *Central Composite Design* (CCD) method at five levels of each variable, to identify the most influential combination on the reaction. The optimum point was obtained at H_2SO_4 concentration of 95%, H_2SO_4 mass ratio of 10% to *cane molasses* mass, and calcium content of 8.3% to *cane molasses* mass with theoretical yield of 99.6013%. Actual simulation results in ChemCAD showed a yield of 80.10%, indicating the need for experimental validation of the statistical model to ensure the suitability of the process to real industrial conditions.

Keywords: sulfuric acid (H_2SO_4), CCD, *Design of Experiment*, calcium concentration, *irreversible* reaction

1. PENDAHULUAN

PT Ajinomoto Indonesia Mojokerto *Factory* merupakan salah satu fasilitas produksi utama milik PT Ajinomoto Indonesia yang berfokus pada pembuatan berbagai produk bumbu dan penyedap rasa, seperti bumbu siap pakai, serta produk pangan berbasis teknologi fermentasi, terutama *monosodium glutamate* (MSG) dengan merek dagang "Ajinomoto". Proses produksinya memanfaatkan *cane molasses* atau tetes tebu sebagai bahan baku utama. *Molasses* digunakan sebagai sumber karbon dalam proses fermentasi mikroba untuk menghasilkan asam glutamat, yang kemudian dimurnikan dan dikristalisasi menjadi MSG. Proses ini mencerminkan integrasi antara teknologi pangan modern dan pemanfaatan limbah industri pertanian secara efisien.

Salah satu tahap awal penting dalam pengolahan *cane molasses* dilakukan di reaktor #1SL pada *Section FI-1/H-1*, yaitu proses dekalsifikasi guna penghilangan kandungan kation Ca^{2+} menggunakan asam sulfat dan mengubahnya menjadi kalsium sulfat (CaSO_4). Keberadaan ion ini dapat mengganggu reaksi fermentasi jika tidak dikendalikan. Pengeliminasian pengotor sejak awal, reaktor ini berkontribusi langsung terhadap kualitas bahan baku yang diproses lebih lanjut dalam tahap fermentasi.

Cane molasses merupakan hasil samping dari industri pengolahan gula dengan bentuk cair. Cairan ini memiliki sumber energi yang esensial dengan kandungan gula di dalamnya. Komposisi umum *cane molasses* yang beragam, kadar sukrosa dapat mencapai 40%, glukosa 14%, kalsium 15%, dan air sekitar 15%, meskipun beberapa sumber atau variasi produk mencatat kadar air hingga 31% [1].

Reaktor #1SL pada *Section FI-1/H-1* saat ini menggunakan konsentrasi asam sulfat (H_2SO_4) sebesar 98% yang dicampurkan melalui penyesuaian pH larutan, tanpa penerapan variasi konsentrasi yang lebih luas. Oleh karena itu, penelitian ini dapat memberikan gambaran pengaruh konsentrasi dan rasio massa reaktan terhadap produk yang dihasilkan melalui simulasi menggunakan *software* ChemCAD. Simulasi proses dekalsifikasi dilakukan dengan suhu 65°C dan tekanan 1 atm [2].

Reaksi dekalsifikasi merupakan salah satu reaksi pengendapan dengan cara penghilangan kandungan garam kalsium (Ca^{2+}) [3]. Penggunaan asam sulfat akan menghasilkan anion SO_4^{2-} yang bereaksi dengan kation Ca^{2+} yang terkandung pada *cane molasses* membentuk garam mineral dalam bentuk endapan yaitu kalsium sulfat (CaSO_4).

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kandungan ion kalsium dalam *cane molasses* memiliki dampak signifikan terhadap proses fermentasi, sehingga perlu dilakukan pengendalian sejak tahap awal. Chotineeranat, dkk. (2010) melaporkan bahwa keberadaan Ca^{2+} dapat menurunkan kinerja *yeast* secara konsentrasi-*dependent*, di mana pada kadar 0,18% (w/v) mulai terjadi penurunan laju fermentasi, dan pada 0,72% (w/v) *yield* etanol menurun hingga 14–25%, bahkan pada konsentrasi tinggi fermentasi dapat terhambat akibat gangguan aktivitas enzim invertase [4]. Studi ini menegaskan urgensi penghilangan kalsium dalam *cane molasses*, namun masih terbatas pada analisis dampak terhadap fermentasi tanpa mengkaji secara spesifik mekanisme maupun kondisi optimal proses dekalsifikasi.

Upaya penghilangan kalsium melalui pembentukan kalsium sulfat juga telah dikaji dalam penelitian lain. Wang, dkk. (2020) menunjukkan konsentrasi H_2SO_4 berpengaruh signifikan terhadap pembentukan CaSO_4 , baik dari sisi morfologi maupun mekanisme

kristalisasi [5]. Pada konsentrasi optimum dihasilkan kristal yang lebih stabil, sedangkan konsentrasi tinggi justru menghambat pertumbuhan kristal. Selain itu, konsentrasi asam juga mempengaruhi jumlah Ca^{2+} terlarut dan laju pembentukan CaSO_4 . Namun, penelitian tersebut masih terbatas pada aspek morfologi dan belum mengkaji pengaruh variabel proses lain secara terintegrasi. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh konsentrasi asam sulfat bersama variabel lain, yaitu kadar kalsium dan rasio massa reaktan, melalui pendekatan simulasi dan optimasi guna memperoleh kondisi pembentukan CaSO_4 yang lebih optimal.

Selain pendekatan eksperimental, penggunaan simulasi proses juga telah dikembangkan untuk menganalisis dan mengoptimalkan reaksi kimia. Salah satu studi oleh Mahsunah dan Suryandari (2020) menyimulasikan produksi triasetin dari gliserol dan asam asetat menggunakan *stoichiometric reactor* di ChemCAD [6]. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa ChemCAD mampu memprediksi pengaruh variabel seperti konversi dan suhu terhadap hasil reaksi secara kuantitatif. Namun, studi tersebut masih bersifat umum dan belum mengkaji proses dekalsifikasi, khususnya pembentukan CaSO_4 dari sistem berbasis *cane molasses*.

Selain itu, penggunaan *software* seperti Minitab dalam desain eksperimen sangat membantu untuk menentukan kombinasi variabel proses yang optimum secara efisien. *Central Composite Design* (CCD) dipilih karena mampu membangun model kuadratik dan mengevaluasi interaksi antar faktor dengan jumlah eksperimen minimal. Danbaba, dkk. (2015) menggunakan CCD tiga faktor lima level di Minitab untuk mengoptimalkan kandungan mineral pada produk ekstrusi, dan berhasil memperoleh model dengan nilai prediktif tinggi [7]. *Software* ini efektif digunakan sebelum proses divalidasi lebih lanjut melalui simulasi di ChemCAD.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan bertujuan untuk menyimulasikan proses dekalsifikasi menggunakan reaktor stoikiometri di ChemCAD dengan optimasi tiga variabel bebas (kadar kalsium, konsentrasi serta rasio massa H_2SO_4 terhadap *cane molasses* guna membentuk kombinasi ketiga variabel yang menghasilkan *yield* pembentukan produk CaSO_4 yang optimal melalui integrasi simulasi proses dan desain eksperimen.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Studi kasus penentuan pengaruh konsentrasi dan rasio massa H_2SO_4 , serta kadar Ca pada *cane molasses* terhadap pembentukan kalsium sulfat dilakukan menggunakan aplikasi simulasi dengan *software* ChemCAD. Sebelumnya, kombinasi variabel diuji dan dioptimasi menggunakan desain eksperimen *Central Composite Design* (CCD) yang diolah dengan *software* Minitab, sehingga setiap skenario simulasi mengacu pada perhitungan statistik yang sudah dirancang untuk membentuk model respon dan menentukan titik optimum dengan *yield* terbaik.

2.1. Deskripsi Proses

Perancangan kombinasi variasi parameter dilakukan terlebih dahulu menggunakan perangkat lunak Minitab. Tiga variabel independen yang diteliti meliputi konsentrasi H_2SO_4 (80–95%), dan rasio massa H_2SO_4 (5–10% dari total massa *cane molasses*), serta kadar kalsium dalam *cane molasses* (10–15%), dimasukkan sebagai faktor dalam desain

eksperimen menggunakan metode *Central Composite Design (CCD)* lima level. Rentang desain yang sudah ditetapkan diberi kode $\pm 1\alpha$ untuk titik faktorial, 0 untuk titik tengah dan $\pm 1\alpha$ untuk titik aksial [7]. Kode-kode tersebut dihitung sebagai fungsi dari rentang minat dari setiap faktor seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hubungan antara nilai kode dan nilai aktual dari variabel bebas

Kode	Nilai Aktual dari Variabel Bebas
$-\alpha$	$X_{\min}$
-1	$\frac{(\alpha - 1)X_{\max} + (\alpha + 1)X_{\min}}{2}$
0	$\frac{X_{\max} + X_{\min}}{2}$
+1	$\frac{(\alpha - 1)X_{\min} + (\alpha + 1)X_{\max}}{2}$
$+\alpha$	$X_{\max}$

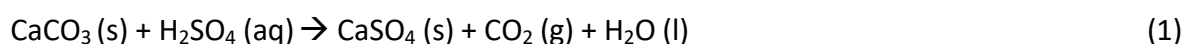
Catatan: $X_{\max}$ dan $X_{\min}$ adalah nilai maksimum dan minimum dari variabel bebas

Desain CCD terdiri atas 15 percobaan yang mencakup 8 titik faktorial, 6 titik aksial, dan 1 titik pusat. Pada Tabel 2, nilai *coded* disusun pada level $-1,68$; -1 ; 0 ; $+1$; dan $+1,68$, menggunakan $\alpha = 1,68$ hasil perhitungan dari persamaan $\alpha = (2^n)^{1/4}$ dengan n adalah jumlah variabel independen [7]. Penentuan efek variabel bebas terhadap variabel terikat. Tingkat kode dan tingkat aktual digunakan. Hasil 15 percobaan dengan formulasi komposisi berbeda dari Minitab ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 2. Penggunaan variabel bebas dan level aktual untuk *Central Composite Design*

Variabel Bebas	Level Variabel Per Kode				
	$-\alpha$	Low	Medium	High	$+\alpha$
	-1,68	-1	0	1	+1,68
Konsentrasi H_2SO_4 (X_1)	75,00	80,00	87,50	95,00	100,00
Rasio massa H_2SO_4 (X_2)	3,30	5,00	7,50	10,00	11,70
Kadar Ca (X_3)	8,30	10,00	12,50	15,00	16,70

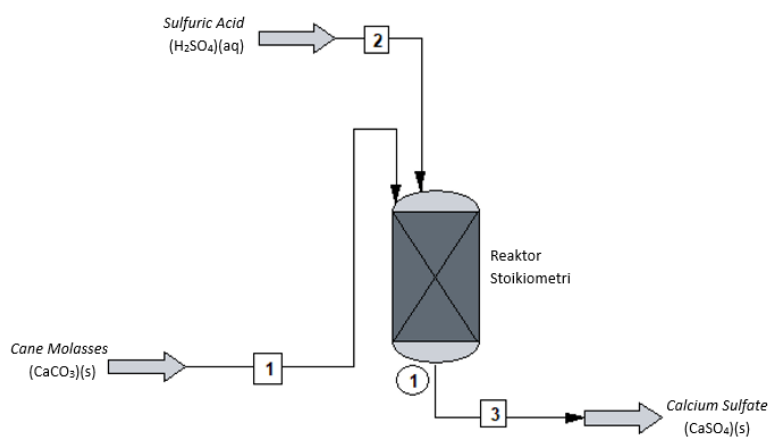
Selanjutnya simulasi penurunan kadar Ca^{2+} dalam bahan baku *cane molasses* menggunakan reaktor stoikiometri dengan suhu $65^\circ C$ dan tekanan 1 atm menggunakan *software* ChemCAD [2]. Simulasi proses ini menggunakan reaktor stoikiometri, karena reaksi dekalsifikasi yang terjadi merupakan reaksi tunggal dengan koefisien stoikiometri, komponen utama, serta nilai konversi yang telah diketahui. Selain itu, reaksi ini bersifat eksotermis sehingga menghasilkan panas selama berlangsungnya proses [6]. Prosesnya dirangkai seperti yang terlihat di Gambar 1, dengan umpan *cane molasses* yang mengandung kalsium karbonat ($CaCO_3$) dan asam sulfat (H_2SO_4). *Thermal mode* menggunakan *adiabatic* dan konversi produk sebesar 80%. Koefisien stoikiometri untuk reaksi yang berlangsung adalah:



Tabel 3. Desain eksperimen menggunakan *Central Composite Design*

Titik Percobaan	Variabel Bebas dalam Bentuk Kode			Variabel Bebas dalam Bentuk Aktual			Yield (%)
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃	
1	-1	-1	-1	80,00	5,00	10,00	44,86
2	1	-1	-1	95,00	5,00	10,00	49,57
3	-1	1	-1	80,00	10,00	10,00	79,99
4	1	1	-1	95,00	10,00	10,00	79,99
5	-1	-1	1	80,00	5,00	15,00	29,90
6	1	-1	1	95,00	5,00	15,00	33,04
7	-1	1	1	80,00	10,00	15,00	59,85
8	1	1	1	95,00	10,00	15,00	66,16
9	-1,68	0	0	75,00	7,50	12,50	51,79
10	1,68	0	0	100,00	7,50	12,50	61,21
11	0	-1,68	0	87,50	3,30	12,50	24,97
12	0	1,68	0	87,50	11,70	12,50	80,03
13	0	0	-1,68	87,50	7,50	8,30	80,00
14	0	0	1,68	87,50	7,50	16,70	42,49
15	0	0	0	87,50	7,50	12,50	56,79

Setelah semua parameter telah diinputkan, proses dapat dijalankan.

**Gambar 1.** Rangkaian proses pada simulasi ChemCAD

Analisis regresi serta evaluasi signifikansi model dilakukan melalui fitur *Analyze Response Surface* pada DOE, sedangkan prediksi titik optimum diperoleh melalui fitur *response optimizer*. Hasil dari Minitab ini menjadi acuan dalam skenario simulasi di ChemCAD untuk memvalidasi kondisi optimum secara termodinamik dan kinetik. Pendekatan ini telah diterapkan secara efektif dalam studi serupa oleh Danbaba, dkk. (2015), yang menggunakan CCD berbasis Minitab untuk optimasi komposisi mineral dalam proses ekstrusi pangan [7].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Transformasi Output Simulasi ChemCAD ke Input Statistik

Hasil simulasi proses dekalsifikasi atau pembentukan kalsium sulfat (CaSO_4) dilakukan menggunakan software ChemCAD 6.5.7. dengan *output* berupa total produk yang dikeluarkan dan produk CaSO_4 (% *weight*) yang ditunjukkan pada Tabel 4. Hasil tersebut kemudian diolah menggunakan persamaan (2) sebagai berikut [8]:

$$\text{Yield (\%)} = \frac{\text{mol produk } \text{CaSO}_4}{\text{mol umpan } \text{CaSO}_3} \times 100 \quad (2)$$

Tabel 4. Hasil simulasi reaktor

Run	Input ChemCAD			Output ChemCAD		
	Konsentrasi H_2SO_4	Rasio massa H_2SO_4	Rasio massa H_2SO_4	Kadar Ca	Total Produk	Produk CaSO_4
	(%)	(%)	(kg/jam)	(%)	(kg/jam)	(%)
1	80,00	5,00	4625,00	10,00	97125,00	5,81
2	95,00	5,00	4625,00	10,00	97125,00	6,42
3	80,00	10,00	9250,00	10,00	101750,00	9,89
4	95,00	10,00	9250,00	10,00	101750,00	9,89
5	80,00	5,00	4625,00	15,00	97125,00	5,81
6	95,00	5,00	4625,00	15,00	97125,00	6,42
7	80,00	10,00	9250,00	15,00	101750,00	11,10
8	95,00	10,00	9250,00	15,00	101750,00	12,27
9	75,00	7,50	6937,50	12,50	99437,50	8,19
10	100,00	7,50	6937,50	12,50	99437,50	9,68
11	87,50	3,30	3052,50	12,50	95552,50	4,11
12	87,50	11,70	10822,50	12,50	103322,50	12,18
13	87,50	7,50	6937,50	8,30	99437,50	8,40
14	87,50	7,50	6937,50	16,70	99437,50	8,98
15	87,50	7,50	6937,50	12,50	99437,50	8,98

Selanjutnya, data *output* dari ChemCAD dihitung hasil *yield* dari setiap variabel menggunakan persamaan neraca massa, untuk mendapatkan data yang tertampil pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil perhitungan *yield* dari eksperimen

<i>Run</i>	Massa CaSO ₄ (kg/jam)	Mol CaSO ₄	Massa CaCO ₃ (kg/jam)	Mol CaCO ₃	<i>Yield</i> (%)
1	5642,96	41492,37	9250,00	92500,00	44,86
2	6235,43	45848,71	9250,00	92500,00	49,57
3	10063,08	73993,20	9250,00	92500,00	79,99
4	10063,08	73993,20	9250,00	92500,00	79,99
5	5642,96	41492,37	13875,00	138750,00	29,90
6	6235,43	45848,71	13875,00	138750,00	33,04
7	11294,25	83045,96	13875,00	138750,00	59,85
8	12484,73	91799,45	13875,00	138750,00	66,16
9	8143,93	59881,85	11562,50	115625,00	51,79
10	9625,55	70776,10	11562,50	115625,00	61,21
11	3927,21	28876,53	11562,50	115625,00	24,97
12	12584,68	92534,42	11562,50	115625,00	80,03
13	8352,75	61417,28	7677,50	76775,00	80,00
14	8929,49	65658,00	15451,66	154516,63	42,49
15	8929,49	65658,00	11562,50	115625,00	56,79

3.2. Pengembangan Model Optimasi

Desain eksperimen dilakukan dengan bantuan Minitab versi 18.0 menggunakan metode *Response Surface Methodology* (RSM) dengan pendekatan *Central Composite Design* (CCD). Metode ini dapat dimanfaatkan untuk membangun model serta mengoptimalkan proses yang diawali oleh serangkaian percobaan guna memperoleh data variabel respon akurat. Setelah itu, dikembangkan model matematika permukaan respon orde dua yang sesuai (*best-of-fit*), untuk kemudian digunakan dalam menentukan kombinasi parameter eksperimen yang optimal sehingga menghasilkan nilai respon terbaik [7]. Hasil desain eksperimen dilakukan simulasi proses menggunakan *software* ChemCAD yang ditunjukkan pada Tabel 3. Hasil dari Tabel 3, memungkinkan pembuatan persamaan matematika untuk respon yang diharapkan terkait dengan tiga faktor (X_1 , X_2 , dan X_3). Penggunaan faktor yang dikodekan, persamaan (3) model yang diestimasi adalah sebagai berikut:

$$Y (\%) = 5 + 1,38X_1 + 12,48X_2 - 11,05X_3 - 0,008X_1X_1 - 0,299X_2X_2 + 0,196X_3X_3 - 0,0103X_1X_2 + 0,0316X_1X_3 - 0,05X_2X_3 \quad (3)$$

Tabel 6. Ringkasan model

Variabel Terikat	S	R ²	R ² _{adjustion}	R ² _{predicted}
<i>Yield</i>	3,04	99,07%	97,40%	83,11%

Berdasarkan Tabel 6, model regresi kuadratik yang dihasilkan dari analisis *Response Surface Methodology* (RSM) menunjukkan performa yang sangat baik dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 99,07%, yang berarti 99,07% variasi respon (*yield*) dapat dijelaskan oleh model. Hal ini menandakan bahwa model memiliki kesesuaian yang

sangat tinggi dengan data eksperimen [9]. Nilai $R^2_{adjusted}$ sebesar 97,40% turut memperkuat validitas model, karena mempertimbangkan kompleksitas jumlah prediktor terhadap jumlah data, serta menunjukkan bahwa model tidak mengalami *overfitting* [10]. Meskipun nilai $R^2_{predicted}$ sedikit lebih rendah, yaitu 83,11%, namun tetap menunjukkan kemampuan prediktif model yang baik terhadap data baru. Perbedaan nilai antara R^2 dan $R^2_{predicted}$ masih dalam batas wajar, menandakan bahwa model tetap layak untuk digunakan sebagai dasar optimasi dan validasi menggunakan simulasi ChemCAD. Selain itu, nilai standar deviasi residual (S) sebesar 3,04423 mengindikasikan bahwa rata-rata deviasi antara nilai prediksi dan nilai aktual tergolong kecil, yang menunjukkan tingkat akurasi model yang tinggi sesuai interpretasi oleh Irfan, dkk. (2020) yang menyatakan bahwa nilai S yang rendah menunjukkan kesalahan prediksi yang kecil [9].

Analysis of variance (ANOVA) yang ditampilkan pada Tabel 7 dan 8 menunjukkan bahwa model regresi kuadratik yang dibangun signifikan secara statistik, dengan nilai F sebesar 91,97 dan $P\text{-value} = 0,000$, yang berada jauh dibawah ambang signifikansi 0,05. Hal ini menunjukkan bahwa model memiliki kemampuan yang sangat baik dalam menjelaskan variabilitas respon, yaitu *yield* yang sesuai dengan Kazeem, dkk. (2018), bahwa model dengan $P < 0,05$ dapat dikatakan sangat representatif terhadap data eksperimen [11].

Dari komponen linier, terlihat bahwa semua variabel utama memberikan pengaruh signifikan terhadap respon. Variabel rasio massa H_2SO_4 memiliki pengaruh paling dominan, dengan nilai F sangat tinggi ($F = 777,24$) dan $P = 0,000$, yang menunjukkan pengaruh kuat terhadap hasil reaksi dekalsifikasi. Variabel kadar Ca dan konsentrasi H_2SO_4 juga signifikan secara statistik ($P < 0,05$), dengan nilai F masing-masing 13,79 dan 15,28.

Sebaliknya, efek kuadratik (*square*) dari masing-masing variabel tidak menunjukkan signifikansi yang berarti terhadap respon, dengan $P\text{-value} > 0,05$, misalnya: kadar Ca^2 ($P = 0,377$) dan $H_2SO_4^2$ ($P = 0,748$). Hal ini menunjukkan bahwa hubungan antara faktor dan respon cenderung linier dibandingkan non-linier, dan model kuadratik mungkin hanya perlu digunakan untuk menyesuaikan sedikit lengkungan (*curvature*) data, bukan dominan dalam prediksi.

Komponen interaksi dua arah, hanya interaksi antara kadar Ca dan rasio massa H_2SO_4 yang menunjukkan pengaruh signifikan ($P = 0,012$), sementara interaksi antar variabel lainnya (misalnya $Ca \times$ rasio massa H_2SO_4) tidak signifikan ($P > 0,05$). Ini menunjukkan bahwa efek gabungan dari Ca dan rasio massa H_2SO_4 memainkan peran penting dalam meningkatkan hasil reaksi, sedangkan interaksi lainnya tidak memberikan kontribusi yang berarti.

Hasil uji error menunjukkan nilai *Mean Square Error* (MSE) sebesar 113.491, yang relatif kecil terhadap nilai total variansi (Adj MS = 10.437.493), menandakan bahwa penyimpangan antara hasil prediksi dan hasil aktual tidak terlalu besar. Dengan demikian, model ini dapat digunakan untuk keperluan prediksi dan optimasi variabel proses dengan tingkat kepercayaan yang tinggi [12].

Tabel 7. Hasil ANOVA Minitab (DF, Adj SS, Adj MS)

Source	DF	Adj SS	Adj MS
Model	9	4940,37	548,93
Linear	3	4858,79	1619,60
Konsentrasi H ₂ SO ₄ (%)	1	65,92	65,92
Rasio massa H ₂ SO ₄ :Massa CM (%)	1	3583,44	3583,44
Kadar Ca (%)	1	1209,43	1209,43
<i>Square</i>	3	77,69	25,90
[Konsentrasi H ₂ SO ₄ (%)] ²	1	1,24	1,24
[Rasio massa H ₂ SO ₄ :Massa CM (%)] ²	1	21,08	21,08
[Kadar Ca (%)] ²	1	9,08	9,08
<i>2-Way Interaction</i>	3	3,88	1,29
Konsentrasi H ₂ SO ₄ (%) * Rasio massa H ₂ SO ₄ :Massa CM (%)	1	0,30	0,30
Konsentrasi H ₂ SO ₄ (%) * Kadar Ca (%)	1	2,81	2,81
Rasio massa H ₂ SO ₄ :Massa CM (%) * Kadar Ca (%)	1	0,78	0,78
Error	5	46,34	9,27
Total	14	4986,71	-

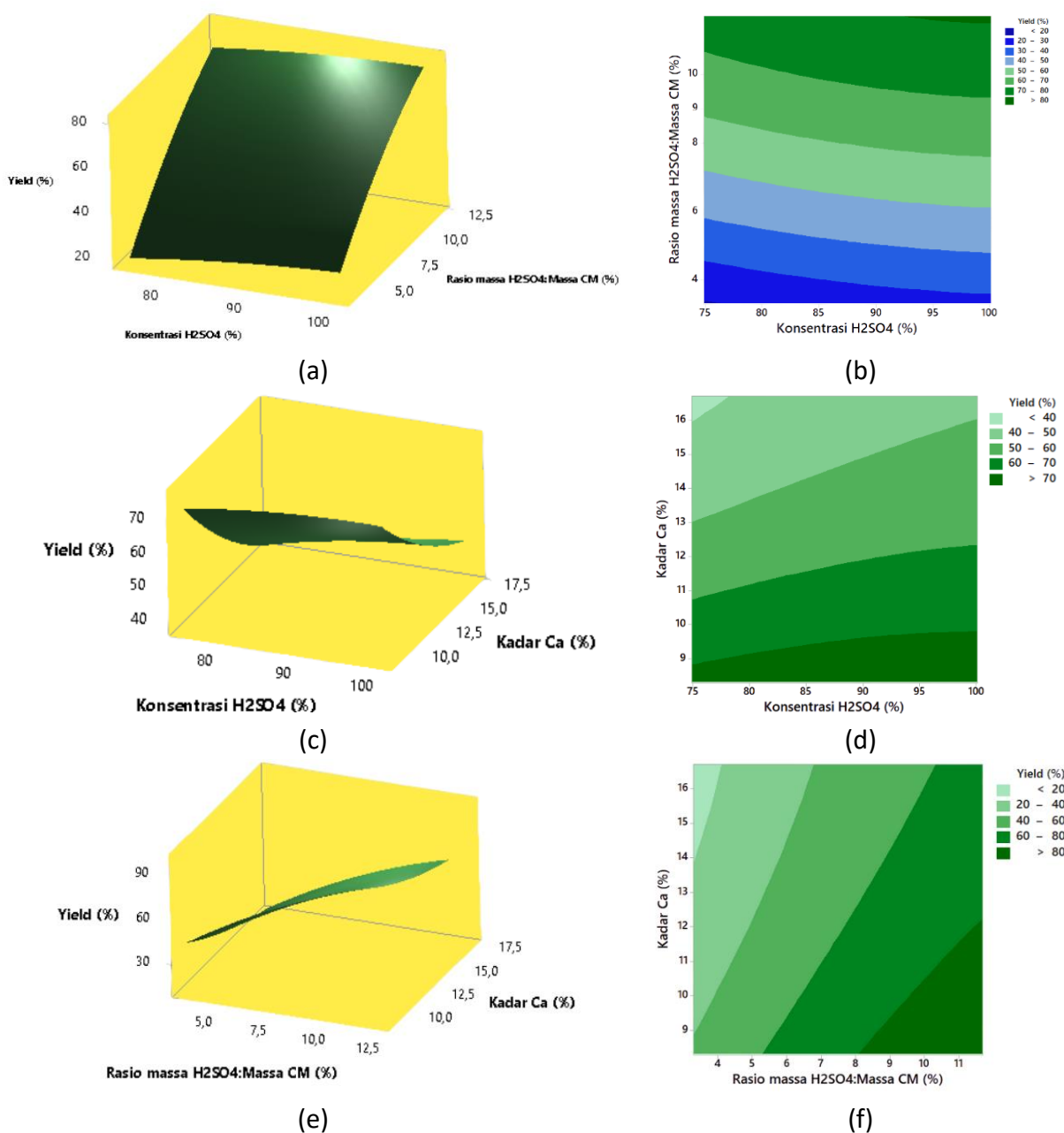
Tabel 8. Hasil ANOVA Minitab (F-Value & P-Value)

Source	F-Value	P-Value
Model	59,23	0,000
Linear	174,76	0,000
Konsentrasi H ₂ SO ₄ (%)	7,11	0,045
Rasio massa H ₂ SO ₄ :Massa CM (%)	386,68	0,000
Kadar Ca (%)	130,51	0,000
<i>Square</i>	2,79	0,149
Konsentrasi H ₂ SO ₄ (%) ²	0,13	0,730
Rasio massa H ₂ SO ₄ :Massa CM (%) ²	2,27	0,192
Kadar Ca (%) ²	0,98	0,368
<i>2-Way Interaction</i>	0,14	0,932
Konsentrasi H ₂ SO ₄ (%) * Rasio massa H ₂ SO ₄ :Massa CM (%)	0,03	0,865
Konsentrasi H ₂ SO ₄ (%) * Kadar Ca (%)	0,30	0,606
Rasio massa H ₂ SO ₄ :Massa CM (%) * Kadar Ca (%)	0,08	0,784

3.3. Pengaruh Variabel Proses

Visualisasi permukaan respon pada Gambar 2 (a)–(f) menggambarkan hubungan antara pasangan variabel proses terhadap *yield* pembentukan CaSO₄. Grafik 3D dan kontur memberikan informasi yang penting mengenai bentuk permukaan, arah peningkatan *yield*, serta kekuatan interaksi antar variabel. Kombinasi konsentrasi dan rasio massa H₂SO₄ (Gambar 2 a–b) memberikan pengaruh paling signifikan, dengan posisi maksimum *yield* berada pada konsentrasi mendekati 95–100% dan rasio sekitar 11% dari *cane molasses*. Permukaan respon berbentuk cembung positif dan menanjak, menandakan efek sinergistik dari kedua variabel. Pola kontur diagonal memperlihatkan interaksi yang kuat, yang didukung oleh nilai $P < 0,05$ dari ANOVA, serta sesuai dengan

temuan Podder dan Mukherjee (2024), bahwa puncak respon sering terjadi di batas atas variabel jika kombinasi tersebut bersifat saling memperkuat [13].



Gambar 2. 3-D *Surface plot* dan *contour plot* 2-D untuk *yield* CaSO_4 : (a) dan (b) menunjukkan pengaruh konsentrasi dan rasio massa H_2SO_4 , (c) dan (d) pengaruh kadar Ca dan konsentrasi H_2SO_4 , (e) dan (f) pengaruh kadar Ca dan rasio massa H_2SO_4

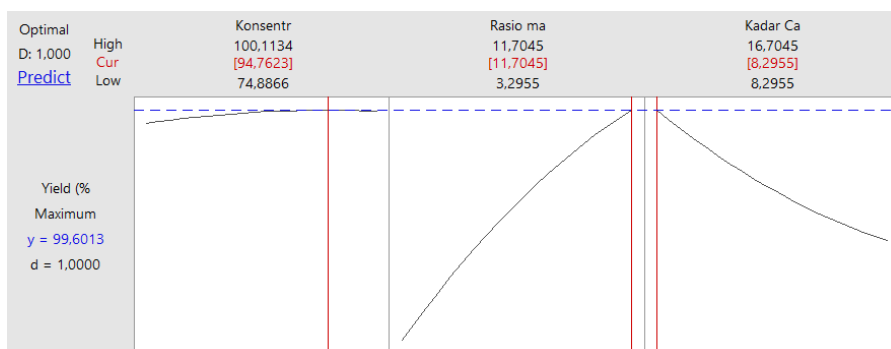
Sebaliknya, *surface response* antara kadar Ca dan konsentrasi H_2SO_4 (Gambar 2c–d) tampak lebih datar dan landai, menunjukkan bahwa kedua variabel tidak saling berinteraksi secara signifikan terhadap *yield* ($P = 0,267$). Permukaan yang datar ini mengindikasikan zona insensitivitas, perubahan variabel memberikan efek terbatas terhadap respon [9]. Sejalan dengan penelitian Igbani, dkk. (2020), pola tersebut

merepresentasikan *comfort zone*, yaitu wilayah proses yang stabil namun tidak berkontribusi signifikan terhadap peningkatan performa [14].

Adapun kombinasi kadar Ca dan rasio massa H_2SO_4 (Gambar 2 e–f) memperlihatkan bentuk permukaan cembung yang signifikan, dengan kontur elips miring yang menunjukkan interaksi kuat. *Yield* meningkat tajam pada kadar Ca rendah dan rasio massa H_2SO_4 tinggi, yang menunjukkan efek interaksi positif nyata sebagaimana dikonfirmasi dari ANOVA ($P = 0,012$). Malenga, dkk. (2022) menyatakan bahwa kontur elips yang menyimpang dari sumbu koordinat merupakan ciri khas dari interaksi dua arah yang kuat dan relevan dalam menentukan zona kerja optimum proses [15]. Grafik permukaan ini memperkuat kesimpulan bahwa interaksi ini adalah faktor dominan dalam optimasi dekalsifikasi.

3.4. Titik Operasi Terbaik Berdasarkan Simulasi

Fitur *Response Optimizer* pada Gambar 3 digunakan untuk menentukan kombinasi variabel input pada *software* ChemCAD (konsentrasi dan rasio massa H_2SO_4 , dan kadar Ca) yang memberikan hasil optimum terhadap respon yang diinginkan, yaitu *yield*.



Gambar 3. Hasil optimasi respon pada Minitab

Hasil optimasi menunjukkan bahwa nilai maksimum *yield* yang diprediksi adalah 99,6013% dengan nilai *desirability* (D) sebesar 1,0000, yang berarti kondisi ini sangat optimal secara teoritis. Namun, ketika dilakukan simulasi proses secara nyata menggunakan ChemCAD, hasil *yield* yang diperoleh hanya sebesar 80,10%, yang menunjukkan adanya perbedaan signifikan dari hasil prediksi. Hal ini bisa disebabkan oleh asumsi-asumsi dalam model optimasi yang tidak sepenuhnya sesuai dengan kondisi proses riil, seperti ketidaktepatan dalam pemodelan kinetika, parameter termodinamik, atau kondisi operasi sistem sebenarnya [16]. Oleh karena itu, penting untuk selalu memvalidasi hasil optimasi dengan simulasi atau eksperimen nyata untuk memastikan akurasi.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Peningkatan konsentrasi H_2SO_4 , rasio massa H_2SO_4 terhadap *cane molasses*, serta kadar kalsium memberikan pengaruh signifikan terhadap pembentukan kalsium sulfat pada proses dekalsifikasi. Kondisi optimum yang diperoleh melalui metode *Central Composite Design* menunjukkan konsentrasi H_2SO_4 sebesar 95%, rasio massa H_2SO_4 sebesar 11,7%, dan kadar kalsium sebesar 8,3%, dengan *yield* teoritis mencapai 99,6013%. Simulasi

menggunakan ChemCAD menghasilkan *yield* aktual sebesar 80,10%, sehingga menunjukkan adanya deviasi yang cukup signifikan antara hasil teoritis dan simulasi. Temuan ini mengindikasikan bahwa model statistik yang digunakan belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi proses aktual.

Saran untuk penelitian selanjutnya yaitu validasi lebih lanjut terhadap model yang dihasilkan melalui simulasi lanjutan maupun uji laboratorium untuk meningkatkan akurasi prediksi. Selain itu, penyesuaian terhadap model kinetika reaksi dan parameter termodinamika perlu dilakukan agar simulasi dapat merepresentasikan kondisi proses yang lebih realistis. Evaluasi terhadap variabel tambahan, seperti suhu dan tekanan, juga disarankan untuk memperoleh model yang lebih komprehensif. Integrasi yang lebih baik antara pendekatan statistik dan simulasi proses diharapkan dapat meminimalkan perbedaan antara hasil teoritis dan aktual.

REFERENSI

- [1] L. Jamir, V. Kumar, J. Kaur, S. Kumar, dan H. Singh, "Composition, Valorization and Therapeutical Potential of Molasses: a Critical Review," *Environmental Technology Review*, vol. 10, no. 1, hal. 131–142, 2021.
- [2] L. D. Abo, S. M. Hailegiorgis, M. Jayakumar, S. V. Prabhu, G. T. Gindaba, A. S. Hamda, dan B. S. N. Prasad, "RSM-, ANN-, and GA-Based Process Optimization for Acid Centrifugation Treatment of Cane Molasses Toward Mitigating Calcium Oxide Fouling in Ethanol Plant Heat Exchanger," *International Journal of Chemical Engineering*, vol. 2024, Article ID 2744213, 19 halaman, 2024.
- [3] T. Vinod Kumar, L. Lavanya Gadam, O. Smyrna, dan D. Uppala, "Decalcification- The Path to Hard Tissue Visualization," *Acta Scientific Dental Sciences*, vol. 6, no. 11, hal. 07–14, 2022.
- [4] S. Chotineerarat, R. Wansuksri, K. Piyachomkwan, P. Chatakanonda, P. Weerathaworn, dan K. Sriroth, "Effect of Calcium Ions on Ethanol Production From Molasses by *Saccharomyces Cerevisiae*," *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists*, vol. 12, no. 2, hal. 120–124, 2010.
- [5] Y. Wang, X. Mao, C. Chen, W. Wang, dan W. Dang, "Effect of Sulfuric Acid Concentration on Morphology of Calcium Sulfate Hemihydrate Crystals," *Materials Research Express*, vol. 7, no. 10, 2020.
- [6] I. Z. Mahsunah dan S. Suryandari, "Simulasi Stoichiometric Reactor pada Produksi Triasetin Berbasis ChemCAD," *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 6, no. 9, hal. 97–102, 2020.
- [7] N. Danbaba, I. Nkama, dan M. H. Badau, "Application of Response Surface Methodology (RSM) and Central Composite Design (CCD) to Optimize Minerals Composition of Rice-Cowpea Composite Blends during Extrusion Cooking," *International Journal of Food Science and Nutrition Engineering*, vol. 2015, no. 1, hal. 40–52, 2015.
- [8] Aulia R. Ramadhanti dan S. Santosa, "Persen Yield (%Yield) sebagai Parameter Evaluasi Proses Kinerja Raw Mill pada Industri Semen," *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 5, no. 1, hal. 24–28, 2023.
- [9] M. F. Irfan, S. M. Z. Hossain, I. Tariq, N. A. Khan, A. Tawfeeqi, A. Goeva, dan M. Wael,

- “Modeling and Optimization of Aqueous Mineral Carbonation for Cement Kiln Dust Using Response Surface Methodology Integrated with Box-Behnken and Central Composite Design Approaches,” *Mining, Metallurgy & Exploration*, vol. 37, no. 4, hal. 1367–1383, 2020.
- [10] R. Ghelich, M. R. Jahannama, H. Abdizadeh, F. S. Torknik, dan M. R. Vaezi, “Central Composite Design (CCD)-Response Surface Methodology (RSM) of Effective Electrospinning Parameters on PVP-B-Hf Hybrid Nanofibrous Composites for Synthesis of HfB_2 -Based Composite Nanofibers,” *Composite Part B: Engineering*, vol. 166, hal. 527–541, 2019.
- [11] M. A. Kazeem, S. M. Z. Hossain, M. M. Hossain, dan S. A. Razzak, “Application of Central Composite Design to Optimize Culture Conditions of *Chlorella Vulgaris* in a Batch Photobioreactor: An Efficient Modeling Approach,” *Chemical Product and Process Modeling*, vol. 13, no. 4, hal. 1–18, 2018.
- [12] T. D. R. Octavia, “Implementasi Algoritma Multiple Linear Regression untuk Memprediksi Temperatur Udara Berdasarkan Kadar Zat Polutan di Kota Tangerang Selatan,” *Skripsi*, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta, 2024.
- [13] S. Podder dan S. Mukherjee, “Response Surface Methodology (RSM) As a Tool in Pharmaceutical Formulation Development,” *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, vol. 17, no. 11, hal. 18–25, 2024.
- [14] S. Igbani, D. Appah, dan H. A. Ogoni, “The Application of Response Surface Methodology in Minitab 16, to Identify the Optimal, Comfort, and Adverse Zones of Compressive Strength Responses in Ferrous Oilwell Cement Sheat,” *International Journal of Engineering and Modern Technology*, vol. 6, no. 3, hal. 20–39, 2020.
- [15] E. N. Malenga, A. F. Mulaba-Bafubiandi, dan W. Nheta, “Application of the Response Surface Method (RSM) Based on Central Composite Design (CCD) and Design Space (DS) to Optimize the Flotation and the Desliming Conditions in the Recovery of PGMs from Mine Sludge,” *Separation Science and Technology*, vol. 57, no. 18, hal. 2960–2983, 2022.
- [16] A. E. Şenaras, “Parameter Optimization Using the Surface Response Technique in Automated Guided Vehicles,” *Sustainable Engineering Products and Manufacturing Technologies*, hal. 187–197, 2019.