

OPTIMASI *SLURRY TANK* PADA PROSES DEKALSIFIKASI PABRIK MONOSODIUM GLUTAMAT UNTUK PERBAIKAN KUALITAS MOLASE

Farros Daffa Ramadhan dan Haris Puspito Buwono

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

farrosdaffar@gmail.com ; [\[haris.puspito@polinema.ac.id\]](mailto:haris.puspito@polinema.ac.id)

ABSTRAK

Permasalahan utama pada molase adalah tingginya kandungan kalsium yang dapat menurunkan hasil fermentasi dan menyebabkan pengotoran peralatan industri. Salah satu cara untuk meningkatkan kualitas molase sebagai bahan baku fermentasi di industri monosodium glutamat adalah dengan proses dekalsifikasi. Tujuan dari studi ini adalah untuk mengevaluasi konversi reaksi dekalsifikasi dan persen massa kalsium karbonat pada produk reaktor tunggal model *continuous stirred tank reactor* (CSTR) dan reaktor ganda yang disusun seri (CSTR kaskade) dengan total waktu tinggal yang sama. Studi ini menggunakan pendekatan simulasi proses dengan membandingkan konfigurasi CSTR tunggal dan CSTR kaskade pada *slurry tank* tanpa mengubah total volume dan waktu tinggal. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penggunaan CSTR kaskade meningkatkan konversi reaksi dekalsifikasi dari 97,79% menjadi 99,71% serta menurunkan persen massa kalsium karbonat pada produk dari 1,26% menjadi 0,16% dibandingkan dengan CSTR tunggal. Penerapan konfigurasi CSTR kaskade direkomendasikan untuk meningkatkan efisiensi proses dekalsifikasi molase sebelum fermentasi molase.

Kata kunci: *continuous stirred tank reactor, dekalsifikasi, kaskade, konversi, molase*

ABSTRACT

The main problem with molasses is the high calcium content, which can reduce fermentation yields and cause industrial equipment fouling. One way to improve the quality of molasses as a fermentation raw material in the monosodium glutamate industry is through a decalcification process. The study aimed to evaluate the decalcification reaction conversion and mass percentage of calcium carbonate product in a single reactor of a continuous stirred tank reactor (CSTR) and a double reactor in series (cascade CSTR) with the same total residence time. The study used a process simulation approach by comparing the configuration of a single CSTR and a cascade CSTR in a slurry tank without changing the total volume and residence time. The simulation results showed that the use of the cascade CSTR increased the decalcification reaction conversion from 97.79% to 99.71% and reduced the mass percentage of calcium carbonate in the product from 1.26% to 0.16% compared to the single CSTR. The application of a cascade CSTR configuration is recommended to improve the efficiency of the molasses decalcification process before molasses fermentation.

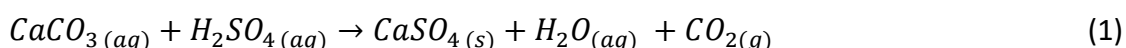
Keywords: *continuous stirred tank reactor, decalcification, cascade, conversion, molasses*

1. PENDAHULUAN

Molase, produk samping yang dihasilkan dari ekstraksi gula, penting untuk industri fermentasi [1]. Namun, saat ini fokus industri gula yaitu pada peningkatan keseluruhan nilai yang diperoleh dari tebu yang dicapai melalui produksi gula kristal dan kombinasi produk

bernilai tinggi yang mengakibatkan hasil gula yang lebih rendah dalam molase [2]. Hal ini membuat molase memiliki kualitas yang semakin memburuk. Kandungan kalsium tinggi dalam molase yang tidak diolah dapat menyebabkan masalah besar selama fermentasi, seperti berkurangnya hasil produk, tertundanya laju pertumbuhan mikroba, dan pengotoran peralatan akibat perkembangan kerak [3]. Kerak yang dapat terjadi pada pipa dan alat industri adalah karena endapan kalsium karbonat (kalsit) dan kalsium sulfat (anhidrit dan gipsum) [4-6].

Penelitian sebelumnya menemukan bahwa berbagai proses *pretreatment* dapat memengaruhi kualitas molase, salah satunya proses dekalsifikasi [1]. Berbagai *pretreatment* telah diuji dengan *pretreatment* molase terbaik untuk produksi asam glutamat yaitu dengan penambahan asam sulfat hingga pH rendah [1,3]. Proses dekalsifikasi merupakan proses penting untuk perbaikan kualitas molase sebelum disuplai ke proses fermentasi asam glutamat. Persamaan (1) adalah persamaan reaksi dekalsifikasi molase [7].



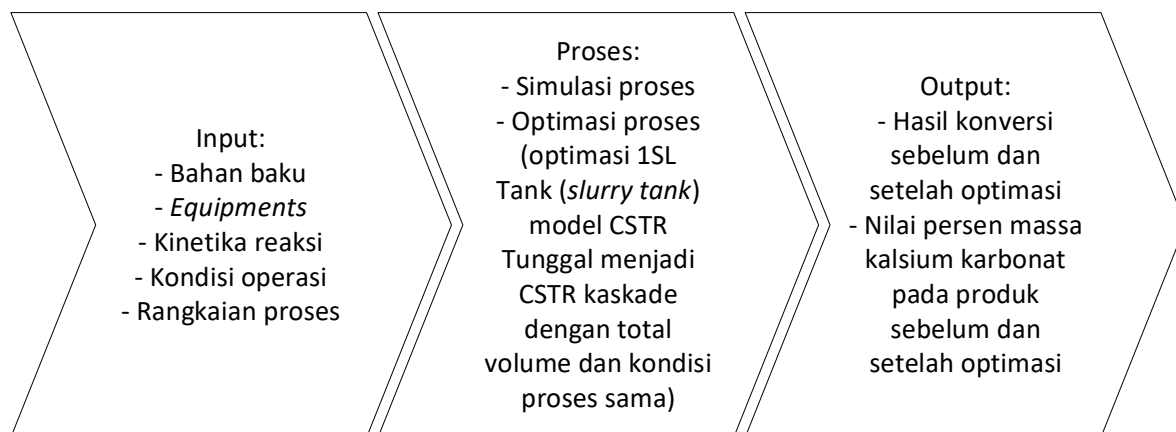
Konversi reaksi merupakan hal penting di proses reaksi. Dengan konversi proses dekalsifikasi yang tinggi, nilai kalsium pada produk *pretreatment* molase akan menurun. Proses dekalsifikasi di Industri Monosodium Glutamat Indonesia menggunakan satu reaktor utama *slurry tank* model *continuous stirred tank reactor* (CSTR) dengan reaksi utama dekalsifikasi. Reaktor tunggal tersebut memiliki waktu tinggal tertentu sekitar 98 menit yang tidak dapat diturunkan atau dinaikkan karena berisiko mengganggu proses-proses berikutnya.

Penelitian sebelumnya pada proses dekalsifikasi kurang menekankan pada peningkatan kondisi reaktor untuk penghilangan kalsium yang lebih baik dan masih menekankan kimia dekalsifikasi dan agen perawatan lainnya. Metode baru, yang menggunakan dua CSTR secara seri (CSTR kaskade), bukan dengan reaktor tunggal tradisional, dapat meningkatkan konversi reaksi dari pada CSTR tunggal meskipun dengan waktu tinggal yang sama karena CSTR kaskade meniru sistem *plug flow reactor* (PFR) sehingga pencampuran dan perpindahan panas pada reaksi lebih efisien [8-11]. CSTR kaskade juga cocok untuk reaksi yang menghasilkan padatan tanpa risiko tersumbat [9]. CSTR kaskade beroperasi secara seri sehingga reaktan diproses secara berurutan dan reaksi lebih stabil [11-17]. Selain itu, CSTR kaskade dapat memiliki kondisi operasi yang lebih terkontrol dan memaksimalkan selektivitas [17-29].

Penerapan simulasi proses dalam konteks khusus ini merupakan pendekatan metodis untuk mengukur manfaat dari konfigurasi reaktor yang diusulkan tanpa eksperimen fisik yang ekstensif. Pendekatan komputasional ini memungkinkan evaluasi sistematis parameter proses dan pengaruhnya terhadap efisiensi dekalsifikasi, menyediakan dasar untuk validasi laboratorium dan skala pilot berikutnya. Tujuan dari studi ini adalah untuk mengevaluasi konversi reaksi dekalsifikasi dan persen massa kalsium karbonat pada produk CSTR tunggal dan CSTR kaskade dengan total waktu tinggal yang sama.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dilakukan secara analitik fundamental kuantitatif menggunakan basis eksperimen yang dihubungkan dengan dasar teori. Selanjutnya, eksperimen dilakukan dengan rangkaian simulasi proses yang dijelaskan pada Gambar 1.



Gambar 1. Flowchart teknik pengumpulan data

Berbagai input yang dibutuhkan sebelum menjalankan simulasi proses adalah properti bahan baku, parameter *equipments*, kinetika reaksi, kondisi reaksi, dan rangkaian proses CSTR tunggal serta CSTR kaskade. Tabel 1 menunjukkan berbagai input properti bahan baku yang diberikan kepada model simulasi.

Tabel 1. Properti bahan baku pada model simulasi

Bahan Baku	Flowrate (ton/h)	T (°C)	p (bar)
<i>Cane Molasses</i>	20,9813	41,0000	1,3000
H ₂ SO ₄ 98% W/W	0,7329	41,0000	1,3000
<i>Steam</i>	0,1000	135,0000	3,0000
<i>IW for 1SL Tank</i>	8,9781	30,0000	1,3000
<i>IW for 2SL Tank</i>	0,8981	30,0000	1,3000
<i>IW for 3SL Tank</i>	0,8981	30,0000	1,3000
<i>IW for 4SL Tank</i>	0,8981	30,0000	1,3000
<i>IW Casing</i>	4,4716	30,0000	1,3000

Kalsium karbonat (CaCO₃) yang terkandung di dalam molase (*cane molasses*) pada Tabel 1 akan didekalsifikasi dengan H₂SO₄ 98% W/W seperti pada Persamaan (1). Bahan baku molase tersebut memiliki *specific gravity* 1,427 menurut data Februari 2024. Berbagai komponen pendukung lainnya yaitu IW (*industrial water*) untuk pengencer molase pada CSTR dan IW *Casing* untuk melindungi *decanter* dari penyumbatan karena kadar kalsium yang tinggi.

Tabel 2. Parameter *equipments* pada model simulasi

Nama Equipments	T (°C)	p (bar)	V (kL)
1SL Tank	66,1000	1,0050	90,0000
HT-1A	66,1000	1,0050	45,0000
HT-1B	66,1000	1,0050	10,0000

Nama Equipments	T (°C)	p (bar)	V (kL)
TCM Separator	66,1000	1,3000	38,8000
2SL Tank	66,0000	1,0050	25,0501
HT-2	66,0000	1,0050	25,0501
3SL Tank	65,9000	1,0050	19,8400
SDC	65,9000	1,3000	19,8400
4SL Tank	65,6000	1,0050	6,5000
Gypsum SDC	65,6000	1,3000	6,5000
Centrifugal Pumps	Depends	1,3000	Depends

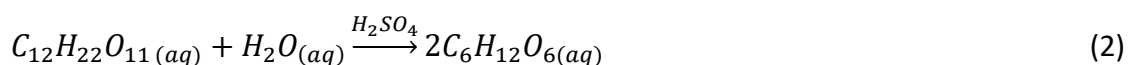
(lanjutan)

1SL Tank pada Tabel 2 adalah *slurry tank* (CSTR tunggal) yang akan dioptimasi karena reaksi dekalsifikasi terjadi pada CSTR tersebut. HT-1A, HT-1B, dan HT-2 adalah separator model *settling tank* atau *clarifier* untuk memisahkan endapan kalsium sulfat (CaSO₄) hasil reaksi dekalsifikasi. TCM Separator adalah *centrifugal separator* untuk pemisahan lanjutan. SDC dan Gypsum SDC adalah *decanter* sebagai pemisah terakhir sehingga tercapai. Suhu pada pompa mengikuti suhu dari alat sebelum pompa.

Tabel 3. Nilai konstanta laju reaksi dan energi aktivasi reaksi pada model simulasi

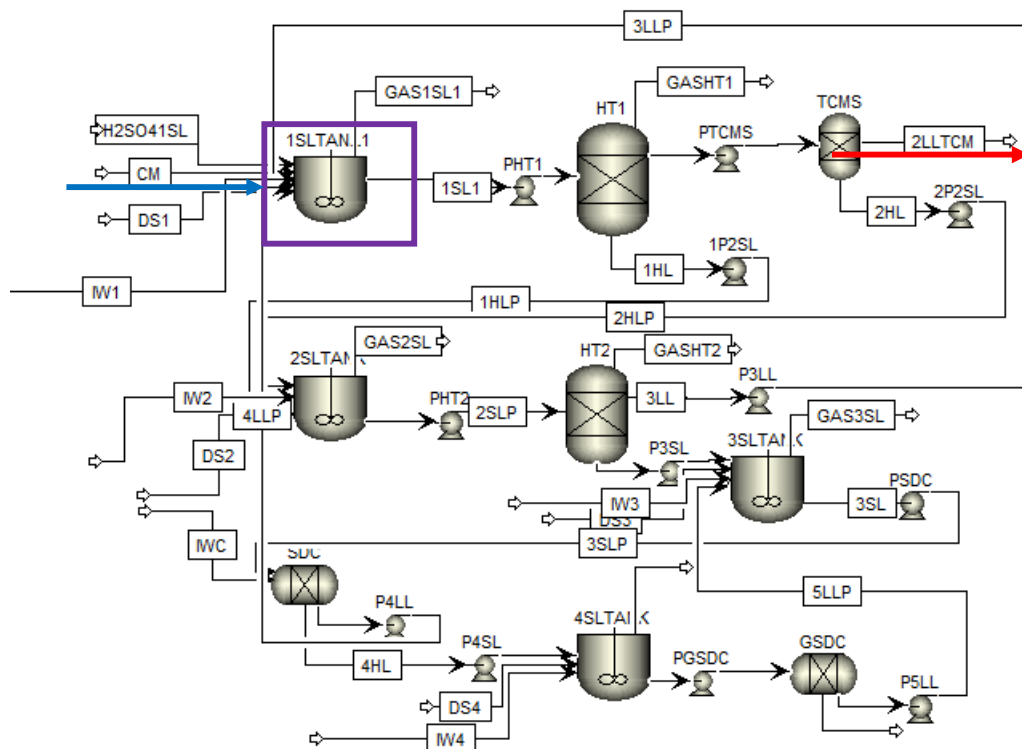
Nama Reaksi	k	E (kJ/mol)
Dekalsifikasi [7]	1,8032	18,5150
Hidrolisis [30]	3,00E+11	113,0000

Reaksi dekalsifikasi dan hidrolisis pada Tabel 3 mengikuti kinetika reaksi orde 1 dengan rumus faktor kinetik yang tampak pada Rumus (1) di mana k = konstanta laju reaksi; T = suhu; N orde 1 = 0; E = energi aktivasi; dan R = konstanta gas ideal = 0,008314 kJ/mol.K. Reaksi hidrolisis yang tampak pada Persamaan (2) termasuk reaksi pada proses dekalsifikasi di 1SL Tank yang digunakan untuk penyederhanaan sukrosa (C₁₂H₂₂O₁₁) [30]. Seluruh rangkaian proses pada simulasi dapat digambarkan seperti Gambar 2, dengan fokus simulasi proses yaitu 1SL Tank pada Gambar 3.



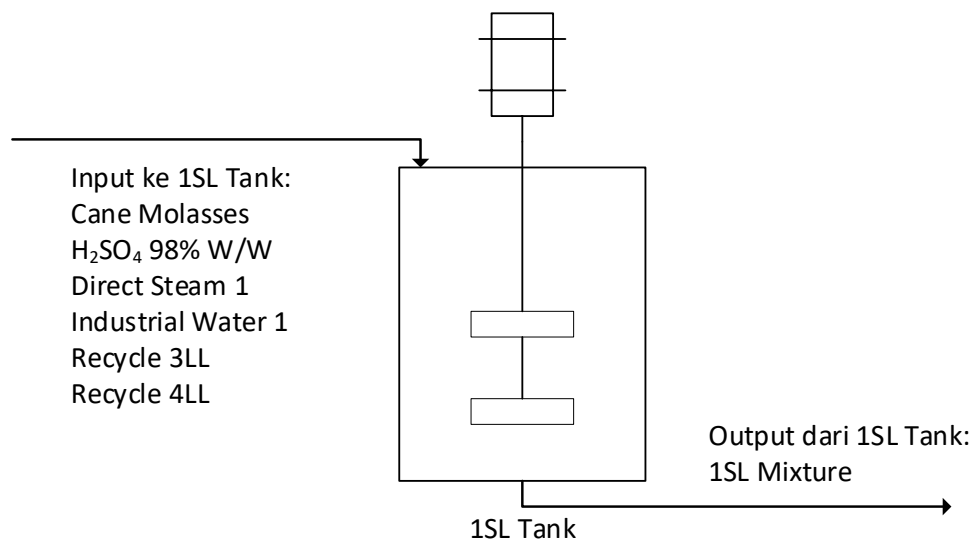
$$f_{\text{faktor kinetik}} = kT^N \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \quad (3)$$

Simulasi proses dilakukan dengan waktu tinggal dipertahankan pada 98 menit dan parameter *equipments* juga dibuat sama sehingga didapatkan konversi reaksi dekalsifikasi yang tidak mengubah nilai waktu tinggal serta memiliki parameter yang sama. Selanjutnya, kondisi operasi yang lain juga ditentukan. Dengan memperhitungkan reaksi dekalsifikasi yang terjadi secara asam basa, model termodinamika Electro-NTRL akan digunakan pada simulasi ini. Selain itu, model simulasi ini dibuat secara *steady-state*.



Gambar 2. Model simulasi proses dekalsifikasi

Bahan baku yang masuk pada 1SL Tank (CSTR tunggal) pada Gambar 2 ditandai oleh panah biru, sedangkan CSTR tunggal tersebut ditandai oleh kotak ungu. Pada CSTR tersebut terjadi proses dekalsifikasi di mana konversi reaksi dekalsifikasi terkalkulasi. Produk dari proses tersebut yaitu TCM (*treated cane molasses*) ditandai oleh panah merah di mana persen massa kalsium karbonat terkalkulasi.



Gambar 3. Model simulasi proses 1SL Tank yang akan dioptimasi

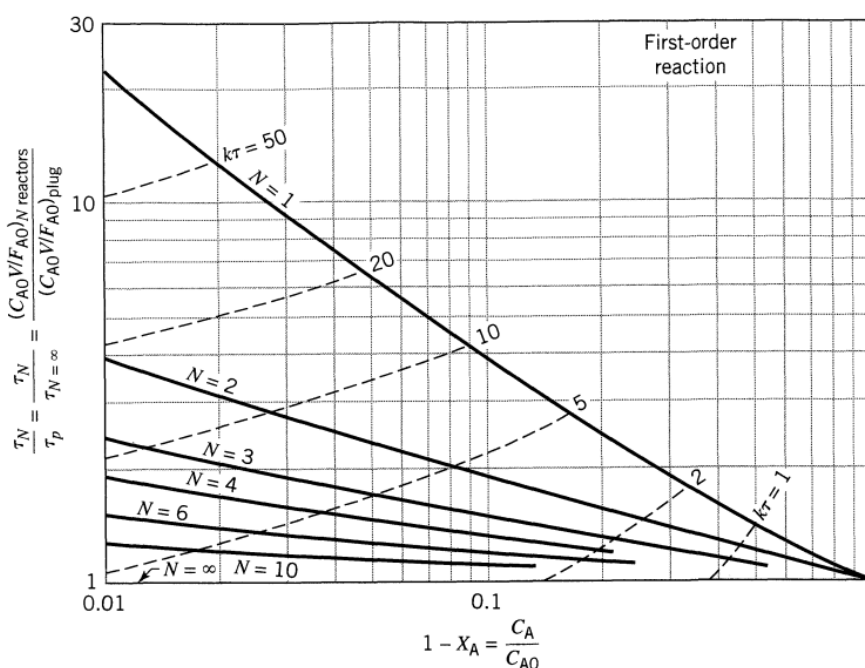
Tabel 4. Parameter *equipment* yang dioptimasi pada model simulasi

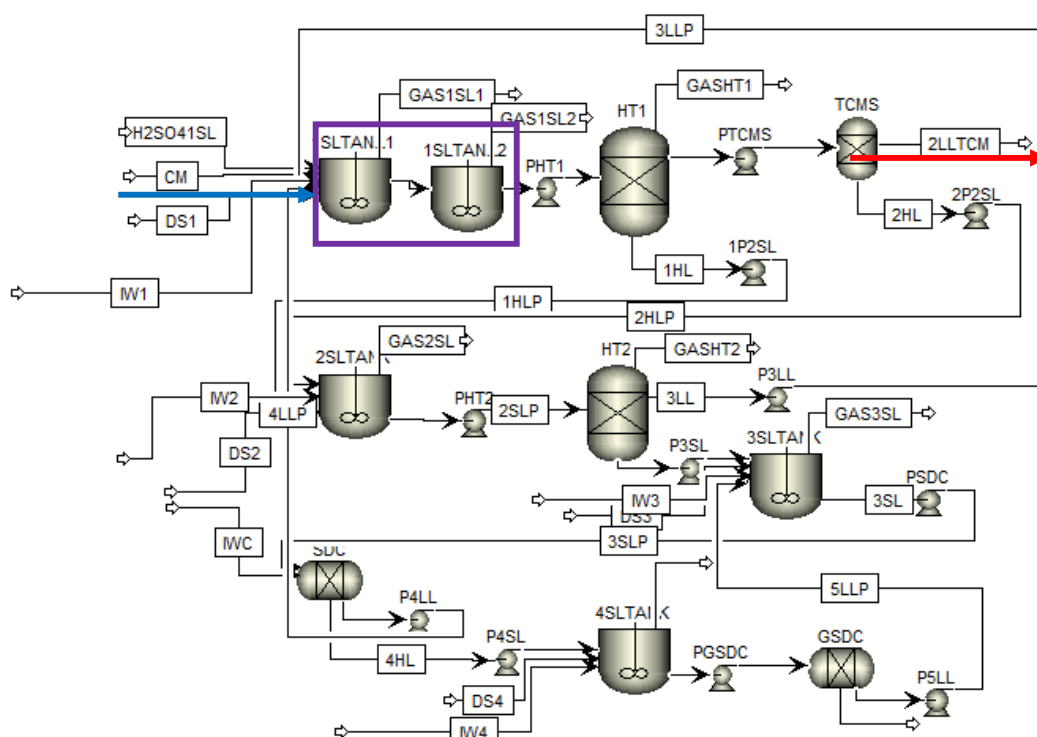
Nama Equipments	T (°C)	p (bar)	V (kL)
1SL Tank A	66,1000	1,0050	45,0000
1SL Tank B	66,1000	1,0050	45,0000

1SL Tank (CSTR Tunggal) pada Gambar 3 dioptimasi menjadi CSTR kaskade (1SL Tank A dan 1SL Tank B) pada Tabel 3 dengan jumlah volume CSTR kaskade harus sama dengan jumlah volume 1SL Tank mula-mula. Hal ini menjadikan nilai waktu tinggal tidak berubah antara sebelum dan sesudah optimasi. Selain itu, nilai suhu dan tekanan tetap sehingga kondisi proses tidak berubah.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah simulasi dijalankan, pada Gambar 2, didapatkan konversi reaksi sebesar 97,7861% pada 1SL Tank (CSTR tunggal) dengan nilai persen massa kalsium karbonat pada produk sebesar 1,2553%. Reaktor ini memiliki kapasitas 90 kL dengan waktu tinggal sekitar 98 menit. Tangki disimulasikan menjadi dua yang disusun secara seri dan tanpa adanya perubahan waktu tinggal atau jumlah volume kedua tangki tetap 90 kL, sehingga model simulasi dibentuk seperti Gambar 5. Konversi reaksi akan semakin meningkat dengan bertambahnya jumlah *mixed flow reactor* (MFR) atau CSTR yang disusun secara seri dengan mempertahankan waktu tinggal hingga konversi maksimal jumlah MFR tidak terhingga atau sebanding dengan *plug flow reactor* (PFR) seperti pada Gambar 4 [8].

**Gambar 4.** Perbandingan kinerja rangkaian *N-Equal Size* MFR dengan PFR untuk reaksi orde pertama [8]



Gambar 5. Modifikasi model simulasi proses dekalsifikasi dengan penambahan CSTR yang disusun secara seri

Gambar 4 tertera untuk setiap penambahan reaktor, volume total reaktor tetap sama dengan volume satu reaktor. Hasilnya, nilai konversi (x_A) akan meningkat tanpa mengubah nilai waktu tinggal (τ) [8]. Dengan ini, proses dekalsifikasi dapat dioptimasi seperti pada Gambar 5. Bahan baku yang masuk pada 1SL Tank A pada Gambar 5 ditandai oleh panah biru, sedangkan CSTR kaskade hasil modifikasi tersebut ditandai oleh kotak ungu. Produk dari proses tersebut tetap ditandai oleh panah merah.

Setelah modifikasi simulasi dijalankan, nilai konversi reaksi CSTR kaskade terhitung sebesar 99,7112%. Hal ini berarti dengan penambahan reaktor yang disusun seri dapat meningkatkan konversi reaksi sebesar 1,9251% dari satu tangki 1SL Tank. Nilai persen massa kalsium karbonat pada produk terhitung sebesar 0,1637%. Hal ini berarti dengan penambahan reaktor yang disusun seri juga dapat menurunkan persen massa kalsium karbonat pada produk hingga 1,0915% dari satu tangki 1SL Tank. Beberapa perbandingan kondisi operasi sebelum dan setelah optimasi tampak pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan kondisi operasi, hasil konversi, dan persen massa kalsium karbonat pada produk sebelum dan sesudah optimasi

Parameter	Sebelum Optimasi	Setelah Optimasi
Total 1SL Tank	1	2
Total Volume (kL)	90	90 (45 + 45)
Holding Time (min)	98	98
CM Flowrate (kg/h)	20981,3	20981,3
H2SO4 Flowrate (kg/h)	732,9	732,9

Parameter	Sebelum Optimasi	Setelah Optimasi
T (°C)	66,1	66,1
p (bar)	1,005	1,005
Calculated Conversion (%)	97,7861	99,7112
Mass Percent of CaCO ₃ in Product (%)	1,2553	0,1637

(lanjutan)

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Simulasi proses dekalsifikasi menunjukkan bahwa penggunaan dua *slurry tank* dengan konfigurasi CSTR kaskade, tanpa mengubah total volume dan kondisi operasi, dapat meningkatkan efisiensi reaksi. Hasilnya, konversi reaksi dapat mencapai 99,7112% atau 1,9251% lebih tinggi dari CSTR tunggal. Selain itu, persen massa kalsium karbonat pada produk dapat mencapai 0,1637% atau 1,0915% lebih rendah dari CSTR tunggal.

Aplikasi simulasi skala laboratorium mengenai konfigurasi CSTR kaskade diperlukan sebagai penelitian selanjutnya sebelum aplikasi langsung di industri. *Pretreatment* molase dengan proses dekalsifikasi di Industri Monosodium Glutamat Indonesia dapat menerapkan hasil simulasi ini dengan menambahkan *separator* untuk membagi reaktor menjadi dua untuk menghemat biaya sehingga hanya membutuhkan satu *agitator* lagi (total dua *agitator*) dalam satu reaktor dengan *separator*.

REFERENSI

- [1] P. A. Wells dan G. E. Ward, "Fermentation processes," *Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 31, no. 2, hal. 172–177, 1939.
- [2] E. Dogbe, M. Mandegari, dan J. Görgens, "Revitalizing the sugarcane industry by adding value to A-molasses in biorefineries," *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 14, no. 5, 2020.
- [3] A. E-N. Zohri, M. Soliman, O. Ibrahim, dan A. Abdelaziz, "Reducing heavy metals content in sugarcane molasses and its effect on ethanol fermentation efficiency," *Egyptian Sugar Journal*, vol. 18, no. 6, hal. 60–67, 2022.
- [4] G. R. Osorio-Celestino, M. Hernandez, D. Solis-Ibarra, S. Tehuacanero-Cuapa, A. Rodríguez-Gómez, dan A. P. Gómora-Figueroa, "Influence of Calcium Scaling on Corrosion Behavior of Steel and Aluminum Alloys," *ACS Omega*, vol. 5, no. 28, hal. 17304–17313, 2020.
- [5] S. Muryanto dan A. Bayuseno, "Scaling of calcium carbonate (CaCO₃) in pipes: Effect of flow rates and tartaric acid as additives on induction time and phase transformation," *Conference: The International Conference on Science and Science Education*, hal. 71–77, 2015.
- [6] T. A. Hoang, M. Ang, dan A. L. Rohl, "Effects of Process Parameters on Gypsum Scale Formation in Pipes," *Chemical Engineering & Technology*, vol. 34, no. 6, hal. 1003–1009, 2011.
- [7] B. C. Mauren, N. I. Kharisma, dan A. W. Harto, "Determination of reaction rate constant for increasing pH level in geothermal hot spring," *IOP Conference Series: Earth & Environmental Science*, vol. 451, no. 1, 2020.
- [8] O. Levenspiel, "Chemical Reaction Engineering," *Industrial & Engineering Chemistry*

- Research*, vol. 38, no. 11, hal. 4140–4143, 1999.
- [9] N. Cherkasov, S. J. Adams, E. G. A. Bainbridge, dan J. A. M. Thornton, “Continuous stirred tank reactors in fine chemical synthesis for efficient mixing, solids-handling, and rapid scale-up,” *Reaction Chemistry & Engineering*, vol. 8, no. 2, hal. 266–277, 2022.
 - [10] R. M. Lindeque dan J. M. Woodley, “Modeling and Experimental Validation of Continuous Biocatalytic Oxidation in Two Continuous Stirred Tank Reactors in Series,” *Organic Process Research & Development*, vol. 26, no. 7, hal. 2030–2037, 2022.
 - [11] Y. Mo dan K. Jensen, “A miniature CSTR cascade for continuous flow of reactions containing solids,” *Reaction Chemistry & Engineering*, vol. 1, no. 5, hal. 501–507, 2016.
 - [12] H. Guo, M. Oosterkamp, F. Tonin, A. Hendriks, R. Nair, J.V. Lier, dan M. Kreuk, “Reconsidering hydrolysis kinetics for anaerobic digestion of waste activated sludge applying cascade reactors with ultra-short residence times,” *Water Research*, vol. 202, no. 6, hal. 117398, 2021.
 - [13] Z. Xu, H. Yuan, dan X. Li, “Anaerobic bioconversion efficiency of rice straw in continuously stirred tank reactor systems applying longer hydraulic retention time and higher load: One-stage vs. Two-stage,” *Bioresource Technology*, vol. 321, no. 33, hal. 124206, 2021.
 - [14] N. Azbar dan R. E. Speece, “Two-Phase, Two-Stage, and Single-Stage Anaerobic Process Comparison,” *Journal of Environmental Engineering*, vol. 127, no. 3, hal. 240–248, 2001.
 - [15] S. Aslanzadeh, K. Rajendran, dan M. J. Taherzadeh, “A comparative study between single- and two-stage anaerobic digestion processes: Effects of organic loading rate and hydraulic retention time,” *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 95, no. 28, hal. 181–188, 2014.
 - [16] S. Ruan, X. Zhang, dan Z. Luo, “Investigation and optimization of polyolefin elastomers polymerization processes using multi-objective genetic algorithm,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 193, no. 4, 2023.
 - [17] C. Hu, “Reactor design and selection for effective continuous manufacturing of pharmaceuticals,” *Journal of Flow Chemistry*, vol. 11, no. 3, hal. 243–263, 2021.
 - [18] L. Peeva, S. Burgal, S. Vartak, dan A. G. Livingston, “Experimental strategies for increasing the catalyst turnover number in a continuous Heck coupling reaction,” *Journal of Catalyst*, vol. 306, no. 20, hal. 190–201, 2013.
 - [19] A. Azizan dan N. Anuar, “Simulating Trambouze reaction for a series reactor Simulating Trambouze reaction for a series reactor,” *Malaysian Journal of Chemical Engineering and Technology*, vol. 3, no. 1, hal 1-6, 2020.
 - [20] C. Hu, B. Shores, R. Derech, C. Testa, P. Hermant, W. Wu, K. Shvedova, A. Ramnath, L. Ismaili, Q. Su, R. Sayin, S. Born, B. Takizawa, T. O'Connor, B. Yang, S. Ramanujam, dan S. Mascia, “Continuous reactive crystallization of an API in PFR-CSTR cascade with in-line PATs,” *Reaction Chemistry & Engineering*, vol. 5, no. 10, 2020.
 - [21] C. Hu, J. Finkelstein, W. Wu, K. Shvedova, C. Testa, S. Born, B. Takizawa, T. O'Connor, X. Yang, S. Ramanujam, dan S. Mascia, “Development of an automated multi-stage continuous reactive crystallization system with in-line PATs for high viscosity process,” *Reaction Chemistry & Engineering*, vol. 3, no. 5, 2018.
 - [22] Y. Wen, L. T. Biegler, M. P. Ochoa, L. Matthews, J. Ferrio, dan J. Weston, “Continuous reactor network design for rigid polyol production,” *Chemical Engineering Science*, vol.

- 230, no. 7, hal. 116189, 2021.
- [23] A. Kalogiannis, I. A. Vasiliadou, A. Spyridonidis, V. Diamantis, dan K. Stamatelatou, "Biogas production from chicken manure wastes using an LBR-CSTR two-stage system : process efficiency , economic feasibility , and carbon dioxide footprint," *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 97, no. 10, 2022.
- [24] W. Yan, V. Vadivelu, dan Y. Maspolim, "In-situ alkaline enhanced two-stage anaerobic digestion system for waste cooking oil and sewage sludge co-digestion," *Waste Management*, vol. 120, no. 5, 2020.
- [25] S. Ghanbari, A. Pashaki, M. Khojastehpour, dan M. Ebrahimi-nik, "Treatment of municipal landfill leachate : Optimization of organic loading rate in a two-stage CSTR followed by aerobic degradation," *Renewable Energy*, vol. 163, no. 2, hal. 1210–1221, 2021.
- [26] G. Gkogkos, E. E. Kahil, L. Storozhuk, N. Thi, dan K. Thanh, "Scaling study of miniaturised continuous stirred tank reactors via residence time distribution analysis and application in the production of iron oxide nanoparticles," *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 203, no. 32, hal. 109880, 2024.
- [27] R. Wahid dan S. J. Horn, "The effect of mixing rate and gas recirculation on biological CO₂ methanation in two-stage CSTR systems," *Biomass and Bioenergy*, vol. 144, no. 40, hal. 105918, 2021.
- [28] C. Galanics dan I. Szalai, "Dynamics of pH Oscillators in Continuous Stirred Tanks in Series," *ChemPhysChem*, vol. 25, no. 23, hal. 6–11, 2024.
- [29] C. E. Lagerman, M. A. Grover, R. W. Rousseau, dan A. S. Bommarius, "Reactor Design and Optimization of α -Amino Ester Hydrolase- Catalyzed Synthesis of Cephalexin," *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 10, no. 208, hal. 826357, 2022.
- [30] S. Bower, R. Wickramasinghe, N. J. Nagle, dan D. J. Schell, "Modeling sucrose hydrolysis in dilute sulfuric acid solutions at pretreatment conditions for lignocellulosic biomass," *Bioresource Technology*, vol. 99, no. 15, hal. 7354–7362, 2008.