

Efektivitas Membran Zeolit-Silika untuk Penyisihan Total Suspended Solids (TSS) pada Limbah POME

Tika Kumala Sari

^{1,2}Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Jember

*Corresponding Author e-mail: tikakumalasari@unej.ac.id

Abstract: Filtration membranes using natural zeolite and silica sand materials can be a promising alternative filtration technology for processing palm oil industrial wastewater. Palm oil wastewater is waste produced by the palm oil industry that contains high TSS content and will pollute the aquatic environment if not optimally treated. This study aims to determine the effectiveness of TSS removal in palm oil wastewater using zeolite-silica membranes. Membrane performance was evaluated through filtration tests using a cross-flow reactor for 100 minutes, with permeate samples taken every 20 minutes at a pressure of 5 bar. Membrane performance was assessed based on membrane flux values and TSS rejection rates. The results showed that the initial TSS characteristics of palm oil wastewater at a 100% concentration were 3,180 mg/L, while at a 50% concentration, they were 1,120 mg/L. The highest TSS removal efficiency was achieved at a 100% wastewater concentration, reached 92.1%.

Keywords: Filtration, POME, membrane, silica, zeolite.

Abstrack: Membran filtrasi yang menggunakan bahan zeolit alami dan pasir silika dapat menjadi teknologi filtrasi alternatif yang menjanjikan untuk pengolahan limbah cair industri kelapa sawit. Limbah cair kelapa sawit adalah limbah yang dihasilkan oleh industri kelapa sawit yang mengandung kandungan TSS (Total Suspended Solids) yang tinggi dan dapat mencemari lingkungan perairan jika tidak diolah secara optimal. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan efektivitas penghilangan TSS pada limbah cair kelapa sawit menggunakan membran zeolit-silika. Kinerja membran dievaluasi melalui uji filtrasi menggunakan reaktor aliran silang selama 100 menit, dengan sampel permeat diambil setiap 20 menit pada tekanan 5 bar. Kinerja membran dievaluasi berdasarkan nilai laju aliran membran dan tingkat penolakan TSS. Hasil menunjukkan bahwa karakteristik TSS awal limbah air minyak sawit pada konsentrasi 100% adalah 3.180 mg/L, sedangkan pada konsentrasi 50% adalah 1.120 mg/L. Efisiensi penghilangan TSS tertinggi dicapai pada konsentrasi limbah air 100%, mencapai 92,1%.

Kata Kunci: Filtrasi, POME, membran, silika, zeolit

Pendahuluan

Industri kelapa sawit mempunyai peran penting dalam memenuhi permintaan global terhadap minyak nabati dengan kontribusi sekitar 40% dari total kebutuhan dunia. Namun di balik pertumbuhan ekonomi yang pesat, industri ini menghadapi tantangan besar terkait keberlanjutan, terutama dalam aspek lingkungan, sosial, ekonomi. Salah satu isu lingkungan utama adalah limbah cair kelapa sawit atau Palm Oil Mill Effluent (POME) yang berpotensi mencemari lingkungan jika tidak ditangani secara tepat. Berbagai studi literatur menunjukkan industri kelapa sawit tidak hanya mencakup pengelolaan lahan namun juga aplikasi teknologi pengolahan limbah yang ramah lingkungan [1]. Limbah cair kelapa sawit mengandung kadar TSS yang tinggi sebesar 1.606 mg/L; BOD 580 mg/L dan minyak sebesar 35 mg/L. TSS adalah komponen padatan yang dapat disaring menggunakan filter dengan diameter pori maksimum 2 µm. komponen penyusun TSS meliputi lumpur, lempung, oksida logam, sulfida, alga mikroorganisme bakteri dan fungi. Kandungan TSS pada air limbah berperan dalam meningkatkan tingkat kekeruhan air dengan cara menghalangi transmisi cahaya yang diperlukan untuk proses fotosintesis dan mengurangi kejernihan visual dalam badan air [2]. Teknologi konvensional pengolahan limbah cair kelapa sawit masih menggunakan kolam terbuka untuk pengolahannya yang terdiri dari cooling ponds, fat ponds, anaerobic ponds, aerobic ponds dan settling ponds. Meskipun teknologi pengolahan menggunakan kolam terbuka cukup murah namun sistem ini membutuhkan waktu retensi yang lebih panjang dan juga menghasilkan lumpur dalam jumlah banyak untuk selanjutnya diolah lagi atau dibuang [3].



Oleh karena diperlukan teknologi pengolahan limbah cair kelapa sawit yang tidak memerlukan waktu retensi yang lama. Salah satu strategi yang potensial dan ramah lingkungan adalah penggunaan teknologi membran dengan material alami seperti zeolit dan silika. Menurut [4] teknologi membran dianggap sebagai solusi ideal karena efisiensi pemisaha yang tinggi, tidak ada produk samping yang bersifat beracun, mampu beroprasi jangka panjang dan efisiensi secara biaya.

Zeolit merupakan mineral alumino silikat yang berstruktur mikropori yang memiliki luas permukaan tinggi dan mempunyai kemampuan selektif dalam menyerap berbagai jenis kontaminan seperti logam berat, senyawa nitrogen, fosfat, zat organik dan zat pewarna [5]. Aplikasi zeolit dalam bentuk membran komposit dapat memberikan potensi baru dalam pengolahan limbah cair dengan menggabungkan keunggulan dari filtrasi membran dan kemampuan selektif adsorpsi zeolit. Oleh karena itu, penggunaan zeolit untuk pembuatan membran menjadi salah satu pendekatan yang menjanjikan untuk pengolahan limbah cair secara efisien dan berkelanjutan. Berdasarkan penelitian [6], silika memiliki luas permukaan yang tinggi, kestabilan termal serta memiliki kemampuan yang baik untuk menyaring berbagai kontaminan organik. Silika menjadi pilihan yang baik untuk diaplikasikan dalam teknologi membran filtrasi limbah cair kelapa sawit.

Berdasarkan penelitian [7] silika dengan rumus molekul SiO_2 dapat menjadi salah satu bahan yang cukup baik mengolah berbagai limbah industri seperti limbah industri batik, limbah industri laundri, limbah cair industri tahu, limbah cair industri kelapa sawit, dan limbah cair industri tekstil. Penelitian ini bertujuan untuk mengkahi efektivitas pengolahan limbah cair kelapa sawit menggunakan membran zeolit-silika pada variasi konsentrasi air limbah 100% dan 50%.

Metode Penelitian

Sampel limbah cair kelapa sawit untuk penelitian ini diperoleh dari PT. X. Sebanyak 10 liter sampe ditampung menggunakan wadah jerigen dan dibawa menuju Laboratorium Pemulihan Air di Jurusan Teknik Lingkungan, ITS. Pengawetan sampel dilakukan dengan penyimpanan sampel di suhu 4°C.

Pasir zeolit dan silika yang digunakan pada penelitian ini dihaluskan sampai ukuran 200 mesh dan diaktivasi menggunakan HCl selama 24 jam. Setelah direndam, pasir zeolit dan silika dicuci menggunakan aquaset sampai ph normal dan dikeringkan dalam oven selama 24 jam.

Pembuatan membran dilakukan melalui dua tahap utama menggunakan metode inversi fasa. Tahap pertama yaitu mencampurkan pasir zeolit dan silika yang telah diaktivasi ke dalam 35 ml 2-Propanol dan di sentrifugasi selama 10 menit pada kecepatan 600 rpm. Endapan yang diperoleh dicampurkan dengan larutan NH_4Cl 3,5 g dalam 200 MI aquadest dan diaduk selama 1 jam menggunakan magnetic stirrer untuk membentuk pori. Tahap kedua adalah pencetakan membran dengan mencampurkan 2,5 g PVA, 5 mL PEG dan aquadest dengan larutan zeolit-silika kemudian dipanaskan sambil diasuk hingga homogen dan mengental. Setelah mengental, larutan dicetak dengan menggunakan cawan petri [10].

Pengujian membran zeolit-silika menggunakan reaktor cross flow. Limbah cair kelapa sawit ditampung di dalam baik dan dipompa menggunakan jenis pompa booster menuju reaktor cross flow. Limbah cair hasil filtrasi yang disebut permeate akan ditampung setiap 10 menit selama 100 menit. Tekanan yang digunakan untuk pengoperasian yaitu 2 bar. Kadar TSS diukur sebelum dan sesudah proses filtrasi membran zeolit-silika. Pada penelitian ini kadar TSS diukur menggunakan metode Gravimetri sesuai SNI 06-6989.3-2004 Pengujian membran

dilakukan dengan menghitung nilai fluks dan nilai rejeksi TSS. Persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai fluks dan nilai rejeksi yaitu [11][12] :

$$J = \frac{V}{A \times t}$$

Keterangan :

J = Nilai fluks ($\text{L}/\text{m}^2.\text{jam}$)

V = Volume filtrasi setiap 10 menit (mL)

t = waktu filtrasi (jam)

A = luas permukaan membran (m^2)

Nilai rejeksi atau efisiensi penyisihan TSS dapat dihitung menggunakan persamaan [13] :

$$R = \frac{C_{awal} - C_{akhir}}{C_{awal}} \times 100\%$$

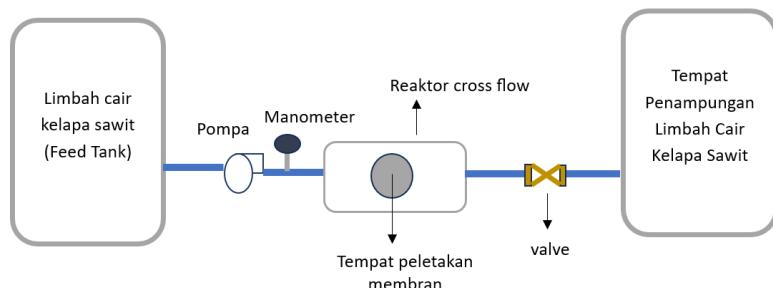
Keterangan :

R = nilai rejeksi (%)

C awal = konsentrasi limbah sebelum filtrasi (mg/L)

C akhir = konsentrasi limbah sesudah filtrasi (mg/L)

Analisis statistika pada penelitian ini menggunakan ANOVA (Analysis of Variance) yang diujikan pada program Minitab. Analisis ANOVA digunakan untuk mengetahui pengaruh konsentrasi air limbah 100% dan 50% terhadap nilai fluks dan efisiensi penyisihan fosfat. Skema aliran reaktor aliran cross flow dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema Aliran Reaktor Aliran Cross Flow

Karakterisasi Membran

Karakterisasi morfologi membran dilakukan pada membran sebelum dan setelah proses filtrasi limbah cair kelapa sawit. Karakterisasi membran menggunakan alat SEM (Scanning Electron Microscopy). Pengujian ini dilakukan dengan cara mengeringkan membran yang akan diujikan. Membran yang telah kering kemudian dibekukan dengan nitrogen cair dan dipotong sesuai ukuran pada alat SEM

Hasil dan Pembahasan

Limbah cair kelapa sawit yang diambil dari PT.X mempunyai ciri fisik berwarna kecoklatan dan berbau. Karakteristik awal dan akhir TSS perlu dilakukan untuk mengetahui efisiensi penyisihan TSS pada setiap variasi konsentrasi air limbah 100% dan 50%. Karakteristik awal TSS ditunkukkan pada Tabel 1.

. Karakteristik Awal Limbah

No.	Konsentrasi Limbah	Konsentrasi TSS (mg/L)
1	100%	14.497
2	50%	3276,7



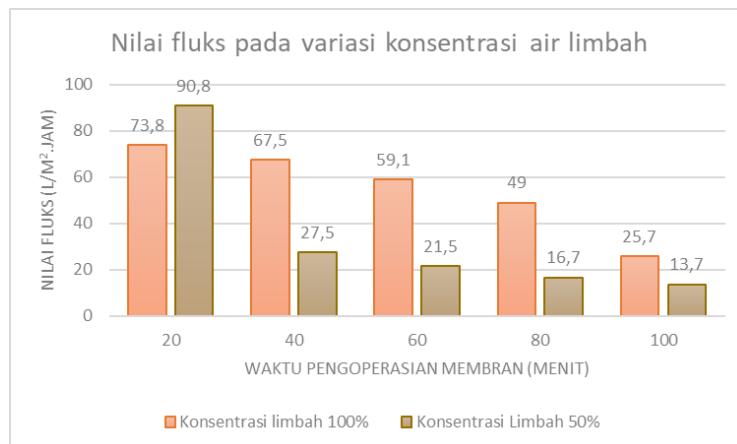
Gambar 2. Hasil Filtrasi Limbah Cair

Pengaruh Konsentrasi Air Limbah Terhadap Nilai Fluks Membran

Nilai fluks merupakan salah satu parameter penting untuk penentuan kinerja membran. Nilai fluks dihitung dari jumlah volume hasil filtrasi yang melewati satuan luas permukaan membran pada waktu tertentu dengan adanya gaya dorong tekanan berupa tekanan dari pompa booster. Luasan membran didapatkan dari pengukuran luas lingkaran area membran yang dilewati air limbah. Luasan membran yang dilewati membran berdiameter 4 cm. Nilai fluks membran zeolit-silika dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai Fluks Membran Zeolit-Silika

Konsentrasi Limbah	Waktu (menit)	Volume permeate (ml)	Nilai Fluks (L/m ² .jam)
100%	20	30,9	73,8
	40	28,3	67,5
	60	24,8	59,1
	80	20,5	49,0
	100	10,8	25,7
50%	20	38,0	90,8
	40	11,5	27,5
	60	9,0	21,5
	80	7,0	16,7
	100	5,8	13,7



Gambar 3. Nilai Fluks Pada Variasi Konsentrasi Limbah

Berdasarkan **Gambar 3**. Nilai fluks konsentrasi limbah 100% berkisar 25,7 L/m².jam – 73,8 L/m².jam, sedangkan pada konsentrasi air limbah 50% nilai fluks membran berkisar antara 13,7 L/m².jam – 90,8 L/m².jam. Nilai fluks terbesar yaitu pada konsentrasi air limbah 50% sebesar 90,8%. Berdasarkan hasil penelitian nilai fluks tertinggi pada konsentrasi air limbah 100% sebesar 73,8 L/m².jam Nilai fluks mengalami penurunan seiring dengan penambahan waktu filtrasi. Terjadi penurunan nilai fluks disebabkan karena scaling di permukaan membran zeolit-silika. Menurut [14], semakin tinggi konsentrasi air limbah akan menurunkan nilai fluks membran. Hal ini disebabkan adanya scaling pada permukaan membran. Semakin tinggi konsentrasi air limbah akan mempercepat terbentuknya scaling pada permukaan membran. Terbentuknya scaling yang semakin cepat menyebabkan nilai fluks semakin kecil. Semakin lama waktu pengoperasian membran, scaling yang terbentuk akan semakin banyak sehingga nilai fluks akan terus menurun. Scaling pada permukaan membran akan menghambar permeasi air melalui membran dan akan menurunkan nilai fluks. Penelitian [15] menyatakan nilai fluks pada awal eksperimen akan berfluktiasi untuk mencegah deformasi membran dan seiring berjalannya waktu pengoperasian membran nilai fluks akan semakin konstan. Semakin tinggi konsentrasi air limbah akan semakin menurunkan nilai fluks karena kandungan TSS pada air limbah semakin tinggi sehingga menyebabkan pembentukan cake pada permukaan membran dan penyumbatan pori-pori membran.

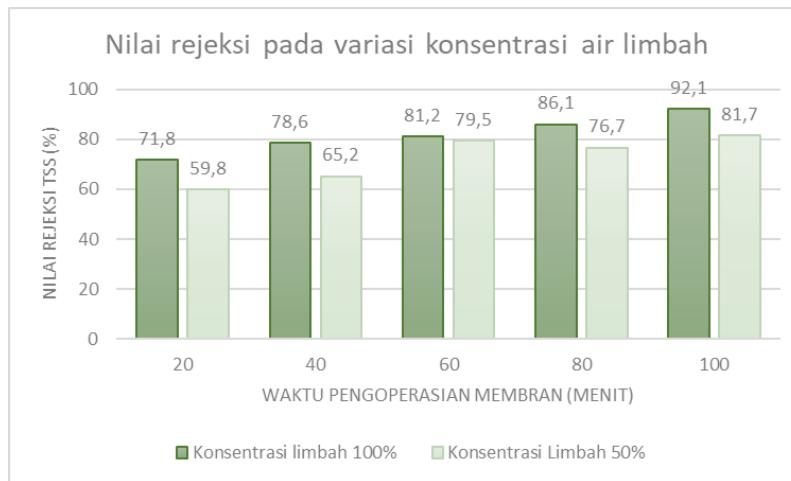
Pengaruh Konsentrasi Air Limbah Terhadap Nilai Rejeksi Total Suspended Solids (TSS)

Analisis permeate TSS dilakukan awal dan setelah proses filtrasi dengan membran zeolit-silika menggunakan reaktor aliran cross flow. Permeate diambil selama 100 menit setiap 20 menit untuk diujikan konsentrasi TSS pada limbah cair kelapa sawi. Karakteristik awal TSS dan nilai rejeksi TSS dapat dilihat pada **Tabel 3** dan **Gambar 4**.

Tabel 3. Nilai Rejeksi TSS Membran Zeolit-Silika

Konsentrasi Limbah	Waktu (menit)	Konsentrasi TSS	Nilai Rejeksi TSS (%)
100%	20	30,9	71,8
	40	28,3	78,6
	60	24,8	81,2

Konsentrasi Limbah	Waktu (menit)	Konsentrasi TSS	Nilai Rejeksi TSS (%)
	80	20,5	86,1
	100	10,8	92,1
	20	38,0	59,8
	40	11,5	65,2
50%	60	9,0	79,5
	80	7,0	76,8
	100	5,8	81,7



Gambar 4. Nilai Rejeksi TSS Pada Variasi Konsentrasi Limbah

Menurut **Gambar 4**. Efisiensi penyisihan pada variasi konsentrasi limbah 100% berkisar antar 71,8% - 92,1 % sedangkan pada konsentrasi air limbah 50% nilai efisiensi penyisihan TSS berkisar 59,8% - 81,7%. Efisiensi penyisihan TSS semakin meningkat seiring dengan dengan lamanya waktu filtrasi. Nilai efisiensi terbesar pada variasi konsentrasi air limbah 100% sebesar 92,1% terjadi pada menit ke 100 waktu pengoperasian membran, dan pada variasi konsentrasi air limbah 50% efisiensi penyisihan TSS terbesar juga terjadi ada menit ke 100 waktu pengoperasian membran sebesar 81,7%. Efisiensi TSS pada variasi konsentrasi limbah 100% lebih besar dibandingkan efisiensi TSS pada variasi konsentrasi air limbah 50%. Hal ini juga didukung oleh penelitian [16] yang menyatakan semakin besar konsentrasi air limbah mengakibatkan fouling pada permukaan membran yang semakin cepat. Pembentukan fouling ini berpengaruh terhadap kemampuan filtrasi membran sehingga seiring berjalannya waktu pengoperasian membran, kualitas air hasil filtrasi akan semakin meningkat.

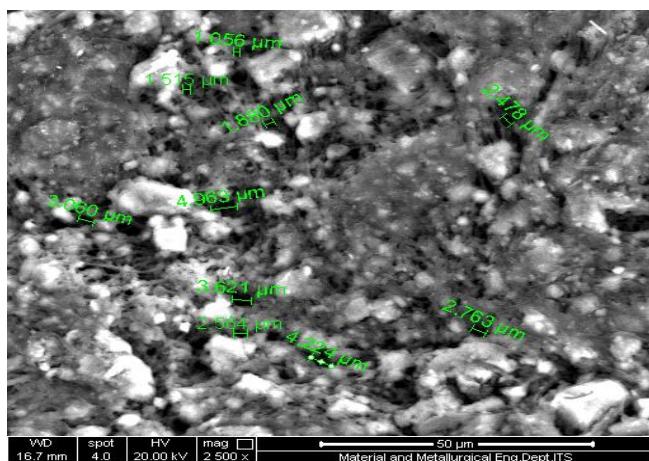
Penelitian [17] menyatakan semakin berjalannya waktu pengoperasian membran, penumpukan kotoran yang terjadi pada permukaan membran juga akan semakin meningkat dan menyebabkan semakin banyak endapan terbentuk pada permukaan membran yang bisa berfungsi sebagai filter tambahan untuk menyaring air limbah sehingga kandungan TSS pada air limbah juga akan semakin berkurang. Proses pemisahan berbasis membran menahan salah satu komponen dan melewatkannya komponen lainnya. Proses ini dilakukan menggunakan gaya dorong berupa tekanan dari pompa booster, sehingga kandungan TSS pada limbah cair dapat tertahan pada membran sementara pelarut dapat menembus membran. Hal ini menyebabkan

konsentrasi air hasil filtrasi membran menjadi lebih rendah dibandingkan konsentrasi air limbah awal. Penumpukan kotoran pada permukaan membran dapat disebut juga dengan fouling membran.

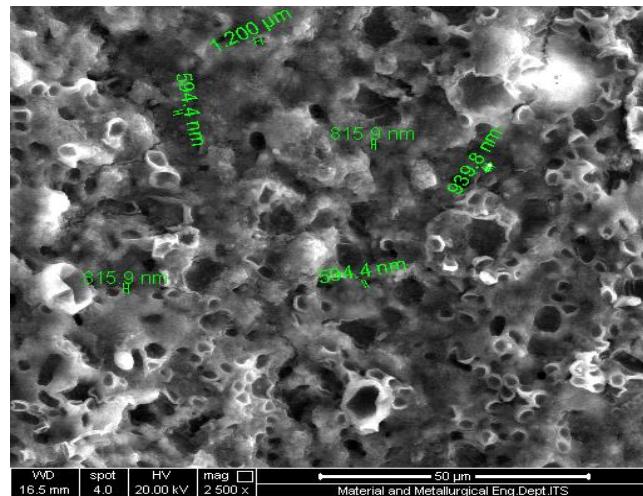
Menurut [11] penumpukan kotoran pada permukaan membran dapat terjadi reversible atau irreversible. Hal ini disebabkan oleh endapan senyawa organik dan anorganik (bakteri, koloid dll) pada permukaan membran. Pembentukan fouling dapat mengurangi laju permeat hingga 18%. Fouling reversible dapat dihilangkan dengan pencucian membran yang tekotaminasi dengan air atau mengubah beberapa parameter. Sedangkan fouling irreversible dapat mengurangi nilai fluks sebesar 26-46% dan dapat diatasi dengan pembersihan secara kimiawi. Penelitian [4] menyebutkan meningkatkan tekanan pengoperasian membran dapat menjadi solusi untuk membersihkan permukaan membran. Limbah cair kelapa sawit mengandung mineral dan garam seperti kalsium karbonat, kalsium fosfat, dan magnesium sulfat yang bisa membentuk endapan padat pada permukaan membran dan dapat menghambat aliran air sehingga bisa mempengaruhi kinerja suatu membran.

Karakterisasi Membran

Analisis SEM dilakukan di Laboratorium Jurusan Material dan Metalurgi, ITS. Analisis SEM dilakukan pada satu sampel membran pada membran pada variasi konsentrasi limbah 100% dengan nilai rejeki tertinggi. Hasil analisis SEM ditunjukkan pada Gambar 4. Berdasarkan Gambar 4 dan Gambar 5 terdapat perbedaan morfologi membran sebelum dan sesudah proses filtrasi. Hasil foto SEM membran setelah filtrasi menunjukkan adanya penumpukan padatan di permukaan membran. Analisis SEM juga dapat menunjukkan perubahan ukuran pori pada membran. Ukuran pori membran setelah proses filtrasi terlihat semakin mengecil dibandingkan ukuran pori membran sebelum proses filtrasi



Gambar 5. Morfologi Membran Sebelum Filtrasi



Gambar 6. Morfologi Membran Setelah Filtrasi

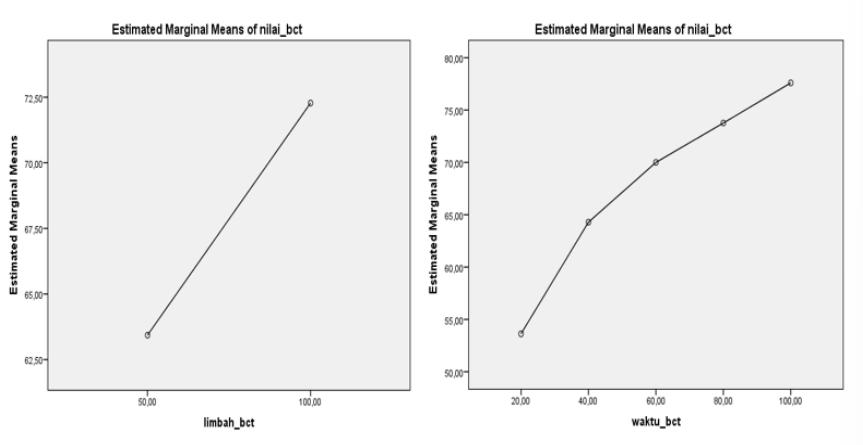
Analisis Statistik ANOVA (Analysis of Variance)

Metode Anova (Analysis of Variance) diujikan pada program IBM SPSS 20. Prosedur Anova menggunakan GLM Univariat yang diukur dari sejumlah sampel untuk menguji hipotesis nol dari populasi yang (diperkirakan) memiliki rata-rata hitung (mean) sama. Analisis Anova dijabarkan per pengaruh penambahan silika, kecepatan centrifuge dan konsentrasi air limbah terhadap nilai fluks dan nilai rejeksi membran. Analisis statistik digunakan untuk mengetahui penambahan masa silika yang optimum, kecepatan centrifuge dan konsentrasi air limbah terhadap nilai rejeksi TSS. Analisis dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Analisis ANOVA

Source		Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Intercept	Hypothesis	#####	1	#####	965.319	.001
	Error	1717.043	2	858,521 ^a		
limbah_bct	Hypothesis	3522.743	1	3522.743	141.333	.000
	Error	4212.345	169	24,925 ^b		
waktu_bct	Hypothesis	12588.623	4	3147.156	126.264	.000
	Error	4212.345	169	24,925 ^b		
parameter_bct	Error	4212.345	169	24,925 ^b		
	Hypothesis	1717.043	2	858.521	34.444	.000
	Error	4212.345	169	24,925 ^b		

Penolakan H_0 terjadi jika nilai signifikansi pada Tabel 4.9 lebih kecil dari nilai α . Tingkat kesalahan α yang digunakan sebesar 5% (0,05) dan diperoleh statistik uji pada Tabel 4.9 diatas. Berdasarkan Tabel 3 diperoleh hasil bahwa nilai signifikansi untuk variasi konsentrasi limbah, waktu operasi, berpengaruh terhadap nilai rejeksi TSS.



Gambar 7. Grafik rata-rata ANOVA pengaruh konsentrasi limbah dan waktu pengoperasi membran

Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan membran zeolit silika mampu untuk menurunkan kadar TSS yang terkandung pada limbah cair kelapa sawit. Nilai rejeksi atau efisiensi tertinggi tertinggi sebesar 92,1% terjadi pada variasi konsentrasi limbah 100% di 100 menit pengujian membran. Berdasarkan hasil analisis statistika nilai signifikansi $< 0,05$ yang artinya variasi konsentrasi air limbah berpengaruh signifikan terhadap nilai rejeksi atau penyisihan kadar TSS pada limbah cair kelapa sawit

Daftar Pustaka

- G.Satriawisti, G. Satriawisti, and J. Parung, "Keberlanjutan Industri Kelapa Sawit: Literature Review," *J@ti Undip J. Tek. Ind.*, vol. 19, no. 3, pp. 122–135, 2024, doi: 10.14710/jati.19.3.122-135.
- S. Sisnayati, D. S. Dewi, R. Apriani, and M. Faizal, "Penurunan BOD, TSS, minyak dan lemak pada limbah cair pabrik kelapa sawit menggunakan proses aerasi plat berlubang," *J. Tek. Kim.*, vol. 27, no. 2, pp. 38–45, 2021, doi: 10.36706/jtk.v27i2.559.
- W. H. Saputera, A. F. Amri, R. Daiyan, and D. Sasongko, "Photocatalytic Technology for Palm Oil Mill Effluent (POME) Wastewater Treatment: Current Progress and Future Perspective," *Material*, vol. 14, pp. 1–35, 2021.
- Q. N. Ho, W. J. Lau, J. Jaafar, M. H. D. Othman, and N. Yoshida, "Membrane Technology for Valuable Resource Recovery from Palm Oil Mill Effluent (POME): A Review," *Membranes (Basel)*, vol. 15, no. 5, 2025, doi: 10.3390/membranes15050138.
- L. F. De Magalhães, G. Rodrigues, A. Eduardo, and C. Peres, "Review Article Zeolite Application in Wastewater Treatment," vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/4544104.
- M. Sorour, M. Helmy, A. EL Mahrouky, and I. Ahmed, "Using activated and Nano Silica as Adsorbent Materials for Filtration of Industrial Wastewater," *Food Technol. Res. J.*, vol. 2, no. 3, pp. 68–72, 2023, doi: 10.21608/ftrj.2023.329291.
- A. Rahayu, M. Maryudi, F. F. Hanum, J. A. Fajri, W. D. Anggraini, and U. Khasanah, "Review: Pengolahan limbah cair industri dengan menggunakan silika," *Open Sci. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–12, 2022, doi: 10.33292/ost.vol2no1.2022.38.
- S. D. W. I. Nurherdiana, *Teknik Preparasi Membran: Teori Dasar Dan Studi Kasus*. Thalibul Ilmi Publishing & Education, 2025. [Online]. Available: https://books.google.co.id/books?id=w_xVEQAAQBAJ

- M. S. Dr. Ir. Ledis Heru Saryono Putro, *Biometana dari Air Limbah Pabrik Pengolahan Kelapa Sawit*. PT. RajaGrafindo Persada - Rajawali Pers, 2023. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=drStEAAAQBAJ>
- T. K. Sari, "Pemanfaatan Membran Zeolit-Silika untuk Menurunkan COD pada Limbah Cair Kelapa Sawit," vol. 5, no. 1, pp. 1–11, 2025.
- J. Bahrouni, H. Aloulou, A. Attia, L. Dammak, and R. Ben Amar, "Surface Modification of a Zeolite Microfiltration Membrane: Characterization and Application to the Treatment of Colored and oily Wastewaters," *Chem. Africa*, vol. 7, no. 8, pp. 4513–4527, 2024, doi: 10.1007/s42250-024-01035-9.
- M. S. H. Ghani, T. Y. Haan, A. W. Lun, A. W. Mohammad, R. Ngteni, and K. M. M. Yusof, "Fouling assessment of tertiary palm oil mill effluent (Pome) membrane treatment for water reclamation," *J. Water Reuse Desalin.*, vol. 8, no. 3, pp. 412–423, 2018, doi: 10.2166/wrd.2017.198.
- E. Yuliwati, H. Porawati, E. Elfidiah, and A. Melani, "Performance of Composite Membrane for Palm Oil Wastewater Treatment," *J. Appl. Membr. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 2, pp. 1–10, 2019, doi: 10.11113/amst.v23n2.147.
- P. Zhao, B. Gao, Q. Yue, S. Liu, and H. K. Shon, "Effect of high salinity on the performance of forward osmosis: Water flux, membrane scaling and removal efficiency," *Desalination*, vol. 378, pp. 67–73, 2016, doi: 10.1016/j.desal.2015.09.028.
- W. Chaipetch, A. Jaiyu, P. Jutaporn, M. Heran, and W. Khongnakorn, "Fouling behavior in a high-rate anaerobic submerged membrane bioreactor (Anmbr) for palm oil mill effluent (pome) treatment," *Membranes (Basel)*, vol. 11, no. 9, 2021, doi: 10.3390/MEMBRANES11090649.
- A. Damayanti and T. Kumala Sari, "The Performance Operation of Zeolite as Membrane with using Laundry Waste Water," *J. Membr. Sci. Technol.*, vol. 6, no. 2, 2016, doi: 10.4172/2155-9589.1000148.
- A. Damayanti, R. Z. Sholihah, T. K. Sari, N. Karnaningoem, and A. Moesriati, "The performance of restaurant wastewater treatment by using zeolite nanofiltration membrane," *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 14, no. 15, pp. 2670–2674, 2019.