

OPTIMASI KONDISI PROSES MEMBRAN ULTRAFILTRASI UNTUK PENGOLAHAN LIMBAH CAIR INDUSTRI KELAPA SAWIT

Erna Yuliwati¹, Ch.Desi Kusmindari²

^{1,2}Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Bina Darma
Jl. A. Yani no 3 Palembang
Telp. (711) 569728

E-mail: erna.yuliwati@binadarma.ac.id

ABSTRAK

Permasalahan limbah berminyak dari industri yang menyebabkan pencemaran sungai dan ketatnya regulasi tentang limbah menjadi perhatian utama bagi industri terutama industri kelapa sawit. Pengolahan limbah secara konvensional belum mampu mencapai standar batas minimum regulasi yang telah ditetapkan. Kendala luas lahan dan teknis pengelolaan limbah yang rumit dan menghasilkan volume *sludge* yang besar. Selain itu khusus untuk mengelola limbah organik cair, sulitnya proses degradasi terhadap limbah akibat tingginya kuantitas dan kandungan kontaminan yang dapat mencapai hingga 40.000-120.000 mg/l untuk COD. Tujuan penelitian ini adalah mendapatkan kondisi proses optimum membran ultrafiltrasi dalam pengelolaan limbah cair industri CPO. Penggunaan *response surface methodology (RSM) (Design expert 8.0.5.2)* terdiri dari 4 tahapan yaitu membuat rancangan percobaan (*design of experiment*), model fitting, optimasi dan verifikasi. Rancangan percobaan menggunakan 2^3 *full factorial design* dengan 28 run yang terdiri dari 18 run pada level dua (-1/+1), 6 run star points dan 4 run replikasi pada center points (0). Model fitting untuk persamaan pada polinomial tingkat empat (*fourth-order polynomial*) dibentuk untuk menggambarkan *goodness-of-fit*. Respon untuk beberapa variabel yang digunakan yaitu *air bubble flow rate (ABFR)*, *hydraulic retention time (HRT)*, *mixed liquor suspended solids (MLSS)*, and *pH*, digunakan untuk mendapatkan nilai optimum kondisi proses filtrasi dan nilai maksimum *total suspended solids (TSS)* and *ammonium nitrogen (NH₃-N)* yang dipisahkan. Hasil dari RSM menunjukkan bahwa nilai optimum kondisi proses filtrasi untuk memisahkan total suspended solids (TSS) sebesar 99.63% dan ammonium nitrogen (NH₃-N) sebesar 92.82 % adalah pada kondisi proses ABFR pada 2.25 ml/min, HRT pada 276.93 min, MLSS concentration pada 4.50 g/L, and pH pada 6.50. Sebagai tambahan, dapat disimpulkan bahwa keempat variabel yang digunakan pada penelitian ini mempengaruhi proses pemisahan secara signifikan pada pemisahan TSS dan ammonium nitrogen dengan merujuk pada nilai ANOVA dari R² sebesar 0,9974 dan 0,999 untuk masing masing harga tersebut. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sebuah pendekatan matematis dapat digunakan untuk menggambarkan kondisi secara teori dan dapat diverifikasi dengan baik.

Kata kunci: *response surface methodology, fourth-order polynomial, membran teknologi, total suspended solids.*

1. PENDAHULUAN

Indonesia mempunyai potensi yang cukup besar untuk pengembangan industri kelapa sawit. Pada saat ini perkembangan industri kelapa sawit tumbuh cukup pesat. Mempunyai dampak positif dan dampak negatif bagi masyarakat. Dampak positif yaitu meningkatkan devisa negara dan kesejahteraan masyarakat meningkat, sedangkan dampak negatif yaitu menimbulkan limbah yang dapat mencemari lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik. Metode yang digunakan adalah pengolahan limbah secara fisik, kimia dan biologi atau kombinasi untuk mengatasi pencemaran.

Limbah cair yang berasal dari industri sangat bervariasi, serta tergantung dari jenis dan besar kecilnya industri. Pada saat ini umumnya industri melakukan pengolahan limbah cair secara kimia yaitu proses *koagulasi-flokulasi, sedimentasi* dan secara *flotasi* dengan menggunakan udara terlarut, serta pengolahan limbah cair secara biologi yaitu proses *aerob* dan proses *anaerob* [1-2]. Proses kimia seringkali kurang efektif dikarenakan biaya untuk pembelian bahan kimianya cukup tinggi dan pada umumnya pengolahan air limbah secara kimia akan menghasilkan *sludge* yang cukup banyak, sehingga industri harus menyediakan prasarana untuk penanganan *sludge*. Pada pengolahan limbah cair secara *flotasi* akan menggunakan energi yang cukup banyak. Pada proses pengolahan limbah secara biologi, umumnya menggunakan lahan yang cukup luas dan energy yang banyak dan menjadi pertimbangan bagi industri yang terletak di daerah yang mempunyai lahan sempit.

Teknologi membran sudah merupakan pilihan sejak 10 tahun yang lalu sebagai pengganti teknologi pemisahan limbah. Sebagaimana yang diketahui, bahan pembuat membran sangat mempengaruhi kualitas membran yang digunakan. Bahan polimer, keramik banyak digunakan untuk pemisahan cairan ataupun gas dalam industri [3-4]. Membran selulosa acetate (CA) mempunyai sifat pemisahan yang bagus namun sayangnya dapat dirusak oleh bakteri dan zat kimia, rentan pH. Adapula membran dari polimer polisulfon, akrilik, juga polikarbonat, PVC, poliamida, polivinyliden fluorida, kopolimer AN-VC, poliasetal, poliakrilat, kompleks polielektrolit, PVA ikat silang. Juga dapat dibuat membran dari keramik, aluminium oksida, zirconium oksida [5-7].

Dalam penelitian ini polimer poliviniliden fluorida digunakan sebagai bahan utama pembuat membran ultrafiltrasi. Beberapa komposisi membran telah dibuat untuk mendapatkan permukaan membran yang optimal sehingga menghasilkan fluks yang maksimal. Penggunaan metode optimasi untuk mendapatkan kondisi proses optimum sangat membantu dalam proses pemisahan yang efisien dan lebih ekonomis.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karakteristik limbah cair industri kelapa sawit

Pada proses pengolahan kelapa sawit menjadi CPO, selain menghasilkan minyak sawit tetapi juga menghasilkan limbah cair, dimana air limbah tersebut berasal dari :

- Hasil kondensasi uap air pada unit pelumatan (*digester*) dan unit pengempaan (*pressure*). Injeksi uap air pada unit pelumatan bertujuan mempermudah pengupasan daging buah, sedangkan injeksi uap bertujuan mempermudah pemerasan minyak. Hasil kondensasi uap air pada kedua unit tersebut dikeluarkan dari unit pengempaan.
- Kondensat dari depericarper, yaitu untuk memisahkan sisa minyak yang terikut bersama batok/cangkang. Hasil kondensasi uap air pada unit penampung biji/inti. Injeksi uap ke dalam unit penampung biji bertujuan memisahkan sisa minyak dan mempermudah pemecahan batok maupun inti pada unit pemecah biji.
- Kondensasi uap air yang berada pada unit penampung atau penyimpanan inti. Penambahan air pada hydrocyclone yang bertujuan mempermudah pemisahan serat dari cangkang.
- Penambahan air panas dari saringan getar, yaitu untuk memisahkan sisa minyak dari ampas.

Tabel 1. Karakteristik limbah cair kelapa sawit dari PTP VII Kabupaten Banyuasin [8].

Nomor	Parameter	Hasil Analisa
1	BOD (mg/l)	25.000 mg/l
2	COD (mg/l)	40.000 mg/l
3	TSS (mg/l)	21.270 mg/l
4	Minyak dan lemak (mg/l)	8.370 mg/l
5	pH	5
6	Temperatur	50 °C

Limbah cair kelapa sawit mengandung konsentrasi bahan organik yang relatif tinggi dan secara alamiah dapat mengalami penguraian oleh mikroorganisme menjadi senyawa-senyawa yang lebih sederhana. Limbah cair kelapa sawit umumnya berwarna kecoklatan, mengandung padatan terlarut dan tersuspensi berupa koloid dan residu minyak dengan kandungan BOD tinggi. Berdasarkan hasil analisa pada tabel 1 menunjukkan bahwa limbah cair industri kelapa sawit bila dibuang kepengairan sangat berpotensi untuk mencemari lingkungan, sehingga harus diolah terlebih dahulu sebelum di buang keperairan, walaupun pada umumnya industri kelapa sawit yang berskala besar telah mempunyai pengolahan limbah cair.

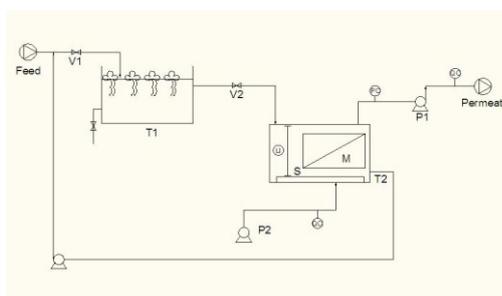
2.2 Membran ultrafiltrasi

Membran adalah sebuah penghalang selektif antara dua fasa. Membran memiliki ketebalan yang berbeda-beda, ada yang tebal dan ada juga yang tipis serta ada yang homogen dan ada juga ada heterogen. Ditinjau dari bahannya membran terdiri dari bahan alami dan bahan sintetis. Bahan alami adalah bahan yang berasal dari alam misalnya pulp dan kapas, sedangkan bahan sintetis dibuat dari bahan kimia, misalnya polimer. Membran berfungsi memisahkan material berdasarkan ukuran dan bentuk molekul, menahan komponen dari umpan yang mempunyai ukuran lebih besar dari pori-pori membran dan melewatkan komponen yang mempunyai ukuran yang lebih kecil. Larutan yang mengandung komponen yang tertahan disebut konsentrat dan larutan yang

mengalir disebut permeat. Filtrasi dengan menggunakan membran selain berfungsi sebagai sarana pemisahan juga berfungsi sebagai sarana pemekatan dan pemurnian dari suatu larutan yang dilewatkan pada membran tersebut.

Teknik pemisahan dengan membran umumnya berdasarkan ukuran partikel dan berat molekul dengan gaya dorong berupa beda tekan, medan listrik dan beda konsentrasi. Proses pemisahan dengan membran yang memakai gaya dorong berupa beda tekan umumnya dikelompokkan menjadi empat jenis diantaranya *mikromembran*, *ultramembran*, *nanomembran* dan *reverse osmosis* [9]. Teknologi membran memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan proses lain, antara lain :

- Pemisahan dapat dilakukan secara kontinu
- Konsumsi energi umumnya relatif lebih rendah
- Proses membran dapat mudah digabungkan dengan proses pemisahan lainnya (*hybrid processing*)
- Pemisahan dapat dilakukan dalam kondisi yang mudah diciptakan
- Mudah dalam *scale up*
- Tidak perlu adanya bahan tambahan
- Material membran bervariasi sehingga mudah diadaptasikan pemakaiannya.



Gambar . 1. Diagram sistem membran (V₁: katup limbah cair, T₁: tanki *phytoremediation*, V₂: pipa tanki membran, S: penghasil gelembung, M: modul membran, T₂: tanki membran, P₁: pompa peristaltik, P₂: kompresor, QC: kontrol aliran fluida, LC: kontrol cairan, LI: indikator batas cairan, PC: kontrol tekanan).

Kekurangan teknologi membran antara lain : *fluks* dan *selektifitas* karena pada proses membran umumnya terjadi fenomena *fluks* berbanding terbalik dengan *selektifitas*. Semakin tinggi fluks seringkali berakibat menurunnya selektifitas dan sebaliknya. Sedangkan hal yang diinginkan dalam proses berbasis membran adalah mempertinggi *fluks* dan *selektifitas*.

Membran ultrafiltrasi adalah teknik proses pemisahan (menggunakan) membran untuk menghilangkan berbagai zat terlarut BM (berat molekul) tinggi, aneka koloid, mikroba sampai padatan tersuspensi dari air larutan. Ukuran dan bentuk molekul terlarut merupakan faktor penting. Dalam teknologi pemurnian air, membran ultrafiltrasi dengan berat molekul membran (MWC) 1000 – 20000 lazim untuk penghilangan pirogen, sedangkan berat molekul membrane (MWC) 80.000- 100.000 untuk pemakaian penghilangan koloid. Terkadang Tekanan sistem ultrafiltrasi biasanya rendah, 10-100 psi (70-700 kPa), maka dapat menggunakan pompa sentrifugal biasa. Membran ultrafiltrasi sehubungan dengan pemurnian air dipergunakan untuk menghilangkan koloid (penyebab fouling) dan penghilangan mikroba, pirogen dan partikel dengan modul higienis.

Tabel 2: Komposisi dari limbah cair berdasarkan aturan kualitas lingkungan

Parameter, satuan	Konsentrasi (S.D.)	Standard Nasional
pH	6.7	5.5 – 9.0
COD, mg/L	555.0 (0.25)	200
NH ₃ -N, mg/L	29.1 (1.02)	20.0
Suspended Solid, mg/L	213.0 (0.07)	100.0

2.3 Metodologi respon permukaan

Metodologi respon permukaan (Response Surface Methodology (RSM)) adalah merupakan kumpulan teknik matematika dan statistik, yang biasa digunakan untuk meningkatkan dan mengoptimalkan

proses. Hal ini dapat digunakan untuk mengevaluasi signifikansi relatif dari beberapa faktor yang mempengaruhi dihadapan. interaksi kompleks. Ketika kombinasi dari beberapa variabel independen dan interaksi mereka mempengaruhi respon yang diinginkan, RSM adalah alat yang efektif untuk mengoptimalkan proses. RSM menggunakan desain eksperimental seperti komposit desain pusat (CCD) untuk menyesuaikan model dengan kuadrat teknik. Metodologi ini mengoptimalkan TSS, NH₃-N kepindahan di terendam proses membran serat berongga.

Design Expert 8.0.5.2 software digunakan untuk desain statistik eksperimen dan analisis data dan dilakukan dalam rangkap. Empat variabel operasi yang paling penting (faktor), tingkat gelembung udara aliran (x₁), waktu retensi hidrolis (x₂), campuran minuman keras konsentrasi suspended solid (x₃), dan pH (x₄), yang dioptimalkan. Rentang studi (tingkat) yang dipilih seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3. Pada tabel ini, nilai-nilai kode untuk x₁, x₂, x₃, x₄ ditetapkan pada 5 tingkat -2, -1 (minimum), 0 (tengah), 1 (maksimum), dan 2. Empat parameter tergantung dianalisis sebagai tanggapan, yaitu, TSS, NH₃-N kepindahan, di mana achieved permeat fluks adalah 145,7 L / m² jam, untuk mendapatkan kondisi proses optimum.

Tabel 3. Variabel dan limit dari peringkat yang dipilih

	Satuan	Simbol		Peringkat				
		<i>uncoded</i>	<i>coded</i>	-2	-1	0	+1	+2
ABFR	min/L	x1	X1	0.3	1.2	2.1	3.0	3.9
HRT	min	x2	X2	120	180	240	300	360
MLSS	mg/L	x3	X3	1.5	3.0	4.5	6.0	7.5
pH	pH	x4	X4	3.5	5.0	6.5	8.0	9.5

Dalam RSM , model dengan bentuk Persamaan (1) dilengkapi dengan data eksperimental dan metode optimasi untuk koefisien model yang dihitung .Untuk mengidentifikasi model yang tepat yang dapat ditampung data, dapat dimulai dengan bentuk model yang paling sederhana seperti pertama dan kedua dari derajat *Scheffe polinomial*. Setelah pengujian model ini untuk kecukupan fit, akan ditambah untuk simpleks massa dan model quartic khusus dengan mendapatkan respon yang tepat. Dalam penelitian ini, model quartic digunakan untuk memprediksi titik optimal dengan persamaan berikut

$$y(x) = \sum_{i=1}^N e_i x_i^4 + \sum_{ij(i<j)}^N e_{ij} x_i^3 x_j + \sum_{ij(i<j)}^N e_i x_i^2 x_j^2 + \sum_{ijk(i<j<k)}^N e_{ijk} x_i^2 x_j x_k + \sum_{ijkl(i<j<k<l)}^N e_{ijkl} x_i x_j x_k x_l \quad 1)$$

dimana y adalah variabel respon , e_i , E_{ij} , E_{ijk} , dan e_{ijkl} adalah koefisien polinomial dari model , x_i , x_j , x_k dan x_l yang tingkat kode dari variabel independen [30].

Semua variabel koefisien ini dianalisis dengan analisis regresi berganda dan kontur respon plot dihasilkan menggunakan software *Design- Expert* . Validitas model yang dipilih digunakan untuk mengoptimalkan parameter proses harus diuji menggunakan analisis varians (ANOVA) yang ditentukan dengan melakukan uji statistik Fisher. Secara khusus, proporsi varians dipamerkan oleh koefisien determinasi R² beberapa harus dekat dengan 1 karena hal ini akan menunjukkan korelasi yang lebih baik antara eksperimen dan nilai-nilai diprediksi [31-34]. Selain itu, model yang baik harus signifikan berdasarkan F - nilai dan P - nilai yang bertentangan dengan kurangnya fit (tidak signifikan) .

3. Analisis Data

3.1 Analisis Statistik

Pada penelitian ini, hubungan antara empat faktor (ABFR, HRT, konsentrasi MLSS, dan pH) dan dua tanggapan (TSS dan NH₃-N efisiensi hasil filtrasi) untuk membran ultrafiltrasi dianalisis dengan menggunakan RSM. Istilah model yang signifikan diinginkan untuk mendapatkan cocok dalam model tertentu.

RSM dianalisis melalui ANOVA, dimana ANOVA adalah teknik statistik yang membagi total variasi dalam satu set data menjadi bagian-bagian yang terkait dengan sumber spesifik dari varians untuk tujuan pengujian hipotesis pada parameter model. ANOVA model ini telah menunjukkan bahwa model ini sangat signifikan sebagai terlihat

dari Tabel 5 dan 6 yang ditabulasikan efek dan interaksi ABFR, HRT, MLSS, dan pH pada TSS dan NH₃-N filtrasi air limbah. Prosedur filtrasi dilakukan untuk menghindari hal yang tidak penting. Nilai-nilai dari analisis ANOVA menentukan peringkat taraf signifikansi itu. Semakin besar besarnya F-nilai dan Sejalan kecil nilai 'Prob> F', yang lebih signifikan adalah model yang sesuai dan koefisien individu. Nilai besar F menunjukkan bahwa sebagian besar variasi dalam respon dapat dijelaskan oleh persamaan regresi. Terkait nilai P menunjukkan juga bahwa model dianggap signifikan secara statistik. Dari Tabel 5, teramati dari analisis ANOVA bahwa tingkat kepercayaan lebih besar dari 80% (P <0,05) untuk respon filtrasi TSS sementara F-nilai dan P-nilai dari model yang masing-masing 163,57 dan 0,0001. Hal ini menunjukkan bahwa model estimasi sesuai dengan data eksperimen memadai. Furthermore, Joglekar dan Mei (1987) menyarankan bahwa untuk cocok model, R₂ harus setidaknya 0,80. Dalam penelitian ini, koefisien determinasi R₂ model itu sangat dekat dengan 1 (0,9974), menyiratkan bahwa sekitar 99,9% dari variabilitas dalam data dijelaskan oleh model. Lebih lanjut menunjukkan bahwa efek utama ABFR (x₁), HRT (x₂), MLSS (x₃), dan pH (x₄) dan interaksi tingkat x₁, x₂, x₃, x₄, x₁x₂, x₁x₄, x₂x₃, x₂x₄, x₃x₄, x₂₂, x₄₂, x₁x₂x₃, x₁x₃x₄, x₂x₃x₄, x₁₂x₂, x₁₂x₃, x₁₂x₂₂ adalah Model signifikan (faktor)

Tabel 5. Anova untuk respon backward quartic model, Respon filtrasi TSS

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F-value	Prob>F
Model	7.49	19	0.39	163.57	< 0.0001 ^a
A	0.033	1	0.033	13.67	0.0061
B	3.05	1	3.05	1265.28	< 0.0001
C	0.049	1	0.049	20.38	0.0020
D	0.0013	1	0.0013	0.55	0.4806
AB	0.10	1	0.10	43.40	0.0002
AC	0.0059	1	0.0059	2.44	0.1570
AD	0.23	1	0.23	95.65	< 0.0001
BC	0.0032	1	0.0032	1.33	0.2816
BD	0.13	1	0.13	55.82	< 0.0001
CD	0.048	1	0.048	20.10	0.0020
A ²	0.0079	1	0.0079	3.28	0.1076
B ²	2.58	1	2.58	1071.70	< 0.0001
D ²	0.039	1	0.039	16.02	0.0039
ABC	0.047	1	0.047	19.49	0.0022
ACD	0.22	1	0.22	90.42	< 0.0001
BCD	0.043	1	0.043	17.73	0.0030
A ² B	2.15	1	2.15	892.03	< 0.0001
A ² C	0.26	1	0.26	107.97	< 0.0001
A ² B ²	0.23	1	0.23	94.00	< 0.0001
Residual	0.019	8	0.0024		
Lack of Fit	0.015	5	0.0029	1.91	0.3149 ^b
Pure error	0.0046	3	0.0015		

Cor Total	7.50	27		
Std. Dev.	0.049		R ²	0.9974
Mean	99.51		Adjusted R ²	0.9913

^aSignificant

^bNot significant

Values of 'Prob>F' less than 0.0500 indicate model terms are significant.

Tingkat kepercayaan analisis ANOVA respon filtrasi NH₃-N, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6, yang lebih besar dari 80% (P <0,05) untuk NH₃-N respon sementara F-nilai dan P-nilai dari model yang 1.975,47 dan 0,0001 masing-masing. Indicatess ini juga bahwa model estimasi sesuai dengan data eksperimen memadai. Lebih lanjut menunjukkan bahwa efek utama ABRF (x₁), HRT (x₂), MLSS (x₃), dan pH (x₄) dan interaksi tingkat yang lebih dari x₁, x₂, x₃, x₄, x₁x₂, x₁x₃, x₁x₄, x₂x₃, x₂x₄, x₃x₄, x₁₂, x₂₂, x₃₂, x₄₂, x₁x₂x₃, x₁x₂x₄, x₁x₃x₄, x₂x₃x₄, x₁₂x₂, x₁₂x₃, x₁₂x₄ x₁x₂₂ dan x₁x₂x₃x₄ adalah model signifikan (faktor).

Tabel 6. Anova untuk respon backward quartic model, Respon filtrasi NH₃-N

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F-value	Prob>F
Model	3874.01	23	168.44	1975.47	< 0.0001 ^a
A	211.70	1	211.70	2482.85	<0.0001
B	344.22	1	344.22	4037.15	<0.0001
C	1.26	1	1.26	14.77	0.0184
D	946.51	1	946.51	11100.98	<0.0001
AB	0.42	1	0.42	4.88	0.0917
AC	0.28	1	0.28	3.32	0.1423
AD	19.44	1	19.44	228.01	0.0001
BC	4.09	1	4.09	48.00	0.0023
BD	4.08	1	4.08	47.86	0.0023
CD	42.55	1	42.55	499.06	<0.0001
A ²	356.95	1	356.95	4186.40	<0.0001
B ²	167.22	1	167.22	1961.23	<0.0001
C ²	29.66	1	29.66	347.85	<0.0001
D ²	950.46	1	950.46	11147.29	<0.0001
ABC	2.73	1	2.73	32.06	0.0048
ABD	2.01	1	2.01	23.52	0.0083
ACD	7.48	1	7.48	87.76	0.0007
BCD	0.23	1	0.23	2.68	0.1768
A ² B	106.04	1	106.04	1243.65	<0.0001
A ² C	63.58	1	63.58	745.66	<0.0001
A ² D	136.58	1	136.58	1601.86	<0.0001

AB ²	63.95	1	63.95	750.08	<0.0001
ABCD	10.41	1	10.41	122.15	0.0004
Residual	0.34	4	0.085		
Lack of Fit	0.21	1	0.21	4.55	0.1227 ^b
Pure error	0.14	3	0.045		
Cor Total	3874.35	27			
Std. Dev.	0.29		R ²		0.9999
Mean	80.38		Adjusted R ²		0.9994

^aSignificant

^bNot significant

Values of 'Prob>F' less than 0.0500 indicate model terms are significant

3.3 Pengaruh faktor di TSS dan filtrasi NH₃-N

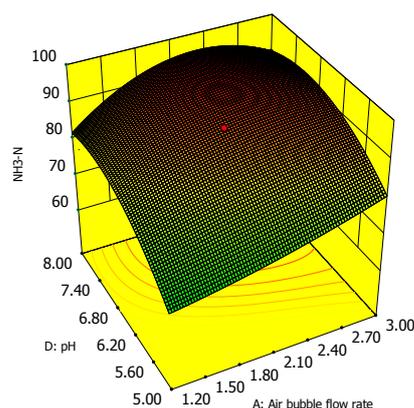
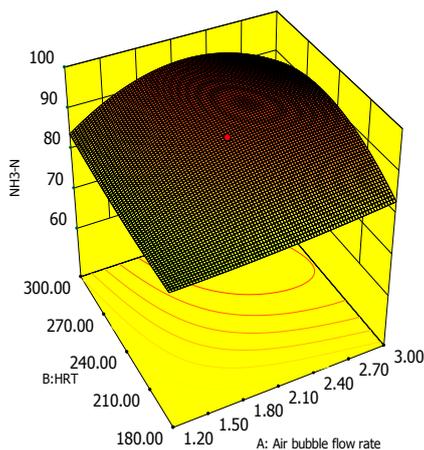
Model regresi dipasang berikut (persamaan dalam hal nilai-nilai kode untuk regressors) digunakan untuk kuantitatif menyelidiki efek dari laju aliran gelembung udara (ABFR), hidrolik waktu retensi (HRT), campuran minuman keras padatan tersuspensi (MLSS) konsentrasi, dan pH pada karakterisasi proses membran terendam total padatan tersuspensi (TSS) dan amonia nitrogen (NH₃-N) efisiensi removal. Menurut model sum berurutan kotak, model dipilih berdasarkan polinomial tertinggi-order di mana persyaratan tambahan yang signifikan. Hubungan empiris antara respon dan variabel diungkapkan oleh persamaan berikut derajat keempat. Efek dari variabel independen terhadap variabel dependen, yaitu TSS (y₁) dan NH₃-N (y₂) efisiensi removal, dievaluasi menggunakan fungsi mendekati pers. (4) dan (5).

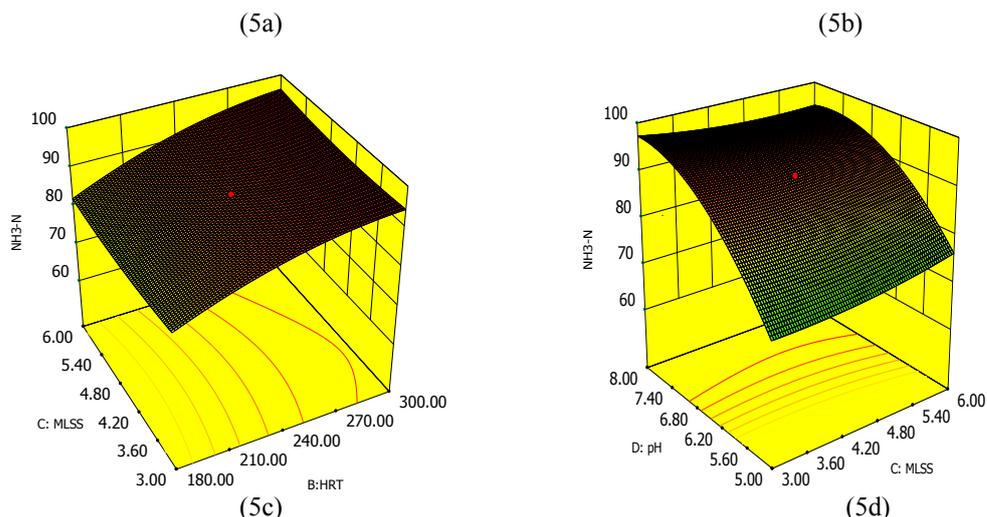
$$y_1 = 99.63 + 0.037 x_1 + 0.62 x_2 - 0.078 x_3 - 0.00741 x_4 + 0.081 x_1x_2 - 0.019 x_1x_3 - 0.12 x_1x_4 + 0.014 x_2x_3 + 0.092 x_2x_4 - 0.055 x_3x_4 + 0.018 x_1^2 - 0.33 x_2^2 + 0.040 x_4^2 + 0.054 x_1x_2x_3 + 0.12 x_1x_3x_4 - 0.052 x_2x_3x_4 - 0.63 x_1^2x_2 + 0.22 x_1^2x_3 + 0.19 x_1^2x_2^2 \quad (4)$$

dimana y₁ didefinisikan sebagai filtrasi TSS dalam larutan permeal dan x₁, x₂, x₃ dan x₄ mewakili ABFR dinormalisasi, HRT, MLSS, dan pH

$$y_2 = 90.39 + 5.14 x_1 + 6.56 x_2 + 0.40 x_3 + 10.88 x_4 + 0.16 x_1x_2 + 0.13 x_1x_3 - 1.10 x_1x_4 + 0.50 x_2x_3 - 1.63 x_3x_4 - 3.86 x_1^2 - 2.64 x_2^2 + 1.11 x_3^2 - 6.29 x_4^2 - 0.41 x_1x_2x_3 - 0.35 x_2x_3x_4 - 0.68 x_1x_3x_4 - 0.12 x_2x_3x_4 - 4.46 x_1^2x_2 + 3.45 x_1^2x_3 - 5.06 x_1^2x_4 - 3.46 x_1x_2^2 - 0.81 x_1x_2x_3x_4 \quad (5)$$

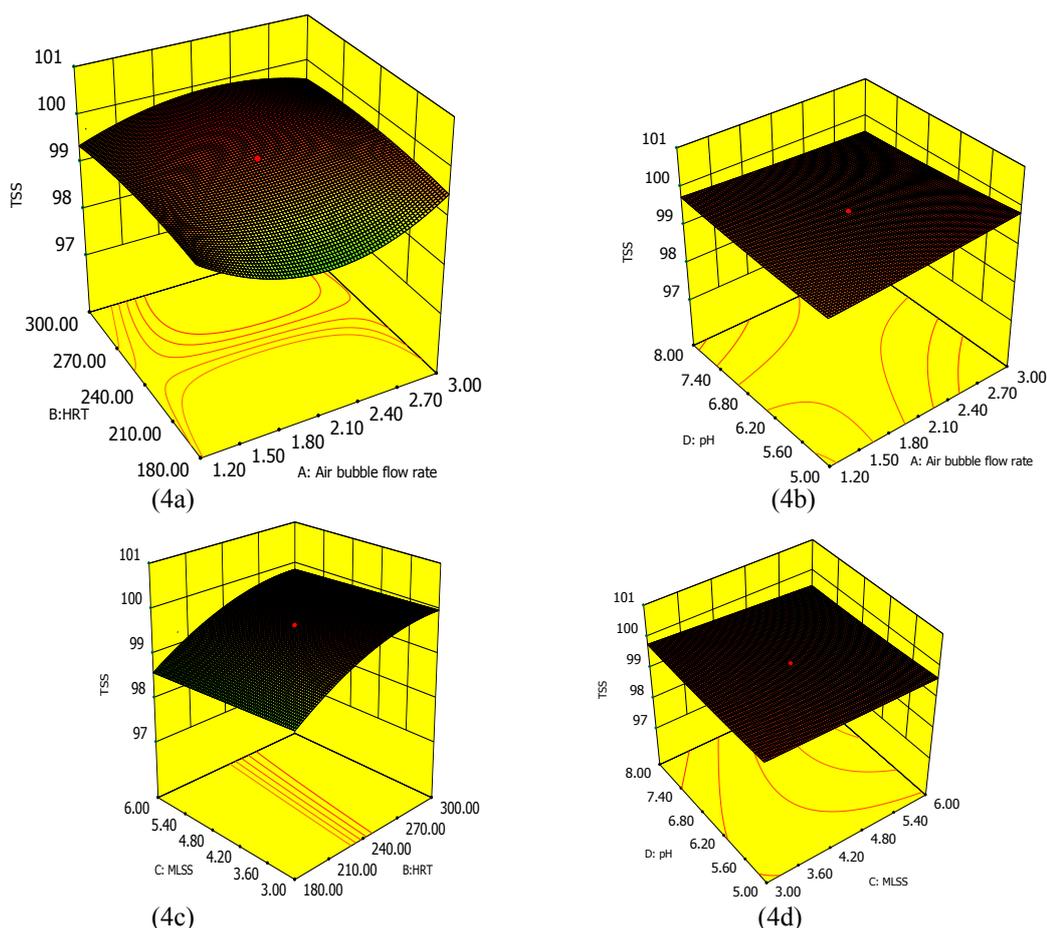
dimana y₂ didefinisikan sebagai filtrasi NH₃ - N dalam larutan permeal dan x₁, x₂, x₃ dan x₄ mewakili ABFR dinormalisasi, HRT, MLSS, dan pH .





Gambar 5. 3-D plot of $\text{NH}_3\text{-N}$ dari model persamaan pada efek proses kondisi: (a) ABFR-HRT, (b) ABFR-pH, (c) HRT-MLSS, (d) MLSS-pH.

Persamaan model empiris tersebut dapat digunakan untuk memprediksi dan mengoptimalkan TSS dan filtrasi $\text{NH}_3\text{-N}$ dalam berbagai faktor variabel penelitian ini. Analisis pada plot probabilitas normal dari residual untuk TSS dan filtrasi $\text{NH}_3\text{-N}$ digambarkan hampir garis lurus sisa distribusi, seperti yang digambarkan pada Gambar 3a, b, yang menunjukkan kesalahan yang merata dan karena itu mendukung kecukupan fit setidaknya persegi. Titik-titik pada plot ini cukup dekat dengan garis lurus, memberikan dukungan untuk kesimpulan yang berasal dari pers. (4) dan (5). Namun, beberapa poin dalam Gambar 3b menunjukkan kesalahan signifikan dalam asumsi variabel. Persamaan (4) dan (5) digunakan untuk memvisualisasikan efek dari faktor eksperimental pada respon dalam kondisi optimal dalam grafik 3D Gambar 4 dan 5. TSS dan efisiensi removal $\text{NH}_3\text{-N}$ diperoleh dengan parameter operasi sebagai ditabulasikan pada Tabel 3. TSS filtrasi efficiency ditemukan meningkat dengan peningkatan ABFR dari 1,2 ml / menit menjadi 2,1 ml / menit dan kemudian menurun dengan peningkatan lebih lanjut ABFR, saat HRT adalah 300 menit. Ini disarankan ABFR signifikan mempengaruhi filtrasi TSS. Efek dari pH dan ABFR, pH dan MLSS pada filtrasi TSS digambarkan dalam Angka 4b, d menunjukkan bahwa filtrasi TSS meningkat ketika pH berubah 8,00-5,00 dan sebagai ABFR meningkat 2,10-3,00 ml / menit (Gambar 4b). Sementara itu, filtrasi TSS meningkat juga ketika pH berubah 8,00-5,00 dan konsentrasi MLSS meningkat 4,50-6,00 g / L (Gambar 4d). Berdasarkan hasil, filtrasi maksimum 99,83% diperoleh saat pH, ABFR, dan MLSS yang 6,50, 2,25 ml / menit, dan 4,50 g / L, masing-masing, di HRT dari 225 menit. Perubahan removal TSS selanjutnya dianalisis sebagai fungsi dari MLSS dan HRT (Gambar 4c). Perlu dicatat bahwa efisiensi penyisihan ditemukan maksimum pada faktor tingkat rendah (-1) dari HRT. Selain itu, filtrasi TSS menurun ketika MLSS berubah 3,00-6,00 g / L. Perlu dicatat bahwa peningkatan HRT pada konsentrasi rendah MLSS (3,00 g / L), mengakibatkan peningkatan removal TSS, namun peningkatan MLSS ke 6,00 g / L sedikit menurun filtrasi TSS, menunjukkan bahwa kinerja proses pada dasarnya diatur oleh konsentrasi MLSS. Sebuah puncak tertinggi di sekitar HRT dari 273 menit dan MLSS 3,00 g / L diamati dalam menghasilkan kontur TSS.



Gambar 4. 3-D plot of TSS from the model equation of effect the condition process :(a) ABFR-HRT, (b) ABFR-pH, (c) HRT-MLSS, (d) MLSS-pH.

Dapat disimpulkan bahwa peningkatan filtrasi TSS terjadi dengan meningkatnya ABFR dan HRT dan dengan menurunnya pH dan konsentrasi MLSS. Namun, peningkatan lebih lanjut dalam ABFR mengakibatkan penurunan filtrasi TSS. Hal ini sesuai dengan kesimpulan yang dibuat oleh Fu et al. (2007). Perhatikan bahwa pada Gambar 4a, ketika ABFR meningkat 1,2-2,1 ml / menit, filtrasi TSS meningkat dengan peningkatan ABFR karena polarisasi konsentrasi berkurang karena turbulensi kuat. Namun, aerasi berlebihan dapat menyebabkan pengurangan ukuran partikel menyebarkan karena geser-diinduksi difusi dan pasukan angkat inersia, sehingga penyumbatan pori lebih parah. Dengan demikian, ada nilai kritis di luar yang meningkat di ABFR telah hampir tidak berpengaruh pada ketahanan fouling atau bahkan memiliki efek yang merugikan. Selain itu, gelembung mungkin terjebak dalam kantong gas antara kelompok serat, meminimalkan luas permukaan membran yang efektif. Ueda et al. (1997) mengamati tingkat aerasi maksimal luar yang peningkatan lebih lanjut tidak berpengaruh pada fouling suppression. Aliran turbulen dapat mengkonsumsi tekanan trans-membran dari sistem, menyebabkan lemah faktor hidrolis dan kemampuan penyerangan yang menyebabkan penurunan filtrasi padatan ditanggihkan.

Filtrasi TSS sangat tergantung pada pH larutan umpan. Filtrasi TSS pada berbagai nilai pH dipengaruhi tidak hanya oleh karakteristik membran, tetapi juga oleh sifat zat terlarut (droplet). Ukuran tetesan emulsi tidak seragam. Pada tingkat pH rendah, kontribusi biaya netralisasi didominasi untuk pembentukan mikro-flok yang cukup untuk halangan sterik. Oleh karena itu, meskipun suspensi digumpalkan yang terakumulasi padat dalam bentuk lapisan pada permukaan membran, sejauh mana ditanggihkan penolakan padat ditingkatkan. Ukuran emulsi dan zeta potensi tetesan emulsi pada air limbah menunjukkan juga bahwa variasi jelas ada dalam ukuran rata-rata tetesan bawah berbagai nilai pH. Pada pH rendah ($pH < 4$), peningkatan filtrasi ditanggihkan agregasi padat sementara itu filtrasi TSS disebabkan oleh pembentukan tebal ditanggihkan deposito padat. Hal ini mungkin karena pengurangan tolakan elektrostatis.

Gambar 5 menunjukkan grafik 3-D dari filtrasi NH_3-N . Hal ini jelas ditunjukkan oleh Gambar 5a bahwa sedikit peningkatan filtrasi NH_3-N terjadi monoton dengan peningkatan ABFR di HRT = 180 min. Filtrasi NH_3-N menunjukkan maksimum pada ABFR dari 2,25 mL / menit ketika HRT dipertahankan pada 300 menit.

Kecenderungan serupa diilustrasikan dalam Gambar 5b, yaitu filtrasi NH₃-N meningkat dengan peningkatan inABFR dari 1,2 mL / menit 2,25 mL / menit, dan kemudian menurun dengan peningkatan lebih lanjut dalam ABFR ketika pH adalah 8,00. Alasan adanya nilai ABFR kritis telah diberikan, sementara membahas efeknya pada TSS removal. The ABFR harus hati-hati dikendalikan untuk mempertahankan ekspansi yang memadai dan perpindahan massa cair-cair dan meminimalkan efek geser. Rosenberger dkk. (2002) juga menyebutkan bahwa ukuran partikel yang lebih kecil di angin-anginkan ultrafiltrasi terendam terutama disebabkan turbulensi kekerasan yang aerasi diproduksi di bawah membran bundel [45]. Pada Gambar filtrasi 5d NH₃-N sedikit menurun, pada pH 8,00, ketika konsentrasi MLSS meningkat dari 3,00 g / L menjadi 6,00 g / L. Kedua Gambar. 5b dan 5d menunjukkan efek yang kuat dari kenaikan pH dari 5 sampai 8. Menurut Gambar. 5c NH₃-N menjadi yang tertinggi dengan nilai HRT tertinggi 300 menit. Hal ini terjadi pada konsentrasi MLSS terendah (3,00 g / L) dan tertinggi (6,00 g / L). Pengamatan atas konsisten dengan kesimpulan yang dibuat oleh Bai dan Tien (2005). Jadi dapat disimpulkan bahwa filtrasi NH₃-N meningkat dengan meningkatnya HRT dan pH dan penurunan konsentrasi MLSS. ABFR harus carrefully dikontrol untuk mempertahankan ekspansi yang memadai dan perpindahan massa dan meminimalkan efek geser dekat nilai optimum. Lebih rendah NH₃-N filtrasi pada konsentrasi MLSS yang tinggi adalah karena membran fouling serius seperti adsorpsi membran dan pori memasukkan yang terjadi pada permukaan membran. Konsentrasi polarisasi pada permukaan membran juga salah satu faktor, seperti yang telah diamati pada ABFR rendah. Perlu namun dicatat bahwa ada alasan lain untuk tinggi NH₃-N filtrasi diamati. Senyawa nitrogen diserap ke hal-hal yang disimpan ditahan oleh membran dalam proses filtrasi. Selain itu, biomassa juga asimilasi nitrogen organik. Ini nilai filtrasi tinggi juga dimungkinkan karena reaksi nitrifikasi yang terjadi di waduk mana amonium adalah sangat larut dalam air. Ion amonium yang terbentuk dapat segera dikurangi menjadi nitrit dan nitrat. Pulefou et al., (2008) mengamati bahwa persentase filtrasi amonia meningkat dengan meningkatnya alkalinitas terlarut amonium dalam air, seperti yang diketahui bahwa ion amonium terbentuk dengan meningkatnya alkalinitas (pH 8,00). TSS dan NH₃-N maksimum efisiensi removal serta variabel operasi pada nilai dioptimalkan untuk pengobatan kilang limbah tercantum pada Tabel 7.

Tabel 7. Kondisi Proses Optimum untuk respon maksimum dengan standar deviasi.

Factors	Optimum value	S.D.
y ₁ (TSS removal efficiency,%)	99.63	0.05
y ₂ (NH ₃ -N removal efficiency,%)	92.89	0.29
x ₁ (Aeration flow rate, ml/min)	2.25	–
x ₂ (HRT, min)	276.93	–
x ₃ (MLSS, g/L)	4.50	–
x ₄ (pH)	6.50	–

4. Kesimpulan

Metodologi respon permukaan digunakan untuk mencari parameter proses optimal dalam filtrasi nitrogen padatan tersuspensi dan amonia untuk pengelolaan air limbah. Analisis statistik ini menunjukkan bahwa semua variabel yang ditetapkan dalam penyusunan model, dalam batas-batas diuji model, memiliki pengaruh yang signifikan pada model. Empat parameter proses, seperti tingkat gelembung udara aliran, waktu retensi hidrolis, campuran padatan tersuspensi dan pH mempengaruhi efisiensi filtrasi TSS dan NH₃-N. Kondisi filtrasi optimal untuk efisiensi filtrasi maksimum TSS (99,63%) dan NH₃-N (92,89%) pada kondisi operasi di ABFR pada 2,25 ml / menit, HRT pada 276,93 menit, konsentrasi MLSS sebesar 4,50 g/L, dan pH 6,50. Selain itu, dapat disimpulkan bahwa empat parameter yang diuji memiliki dampak yang signifikan terhadap TSS dan filtrasi NH₃-N, ditanggung oleh analisis statistik (ANOVA) dari nilai R² yang 0,9974 dan 0,9999. Telah disimpulkan bahwa pendekatan matematika berguna untuk memprediksi proses kondisi pada proses ultrafiltrasi.

PUSTAKA

- A.W. Zularisam, A.F. Ismail, M.R. Salim, Mimi Sakinah, T. Matsuura, Application of coagulation-ultrafiltration hybrid process for drinking water treatment: Optimization of operating conditions using experimental design, *Sep. Purif. Technol.* (2008).
- C.H. Lu, W. H. Wu, R. B. Kale, Microemulsion-mediated hydrothermal synthesis of photocatalytic TiO₂ powders, *J. Hazard. Mat.* 154(2008) 649-654.
- D. Jeison, J.B. van Lier, Cake layer formation in anaerobic submerged membrane bioreactors (AnSMBR) for wastewater treatment, *J. Membr. Sci* 284 (2006) 227-236.
- E. Fontananova, J.C. Jansen, A. Cristiano, E. Curcio, E. Drioli, Effect of additives in the casting solution on the formation of PVDF membranes, *Desalination* 192(2006) 190-197.
- F. Wicaksana, A.G. Fane, V. Chen, Fibre movement induced by bubbling using submerged hollow fibre membranes, *J. Membr. Sci.* 271(2006)186-195.
- G. Guglielmi, D. Chiarani, S.J. Judd, G. Andreottola, Flux criticality and sustainability in a hollow fibre submerged membrane bioreactor for municipal wastewater treatment, *J. Membr. Sci.* 289(2007)241-248.
- L. Xianling, W. Jianping, Y. Qing, Z. Xuemin, The pilot study for oil refinery wastewater treatment using a gas-liquid-solid three phase flow airlift bioreactor. *Biochem. Eng. J.*, 27 (2005) 40-44.
- M.L. Hami, M.A. Al-Hasyimi, M.M. Al-Doori, Effect of activated carbon on BOD and COD removal in a dissolved air flotation unit treating refinery wastewater, *Desalination* 216(2007) 116-122.
- N. Ren, Z. Chen, A. Wang, D. Hu, Removal of organic pollutants and analysis of MLSS-COD removal relationship at different HRTs in a submerged membrane bioreactor, *Int. Biodeterioration. Biodegradation* 55 (2005) 279-284.
- S. P. Deshmukh, K. Li, Effect of ethanol composition in water coagulation bath on morphology of PVDF hollow fibre membranes, *J. Membr. Sci.* 150 (1998) 75-85.
- W.J. Lau, A.F. Ismail, Application of response surface methodology (RSM) in PES/SPEEK NF membrane for synthetic dyeing solution treatment, Chap. 7, Thesis, Universiti Teknologi Malaysia (2009).
- X.C. Cao, J. Ma, X.H. Shi, Z.J. Ren, Effect of TiO₂ nanoparticle size on the performance of PVDF membrane, *Appl. Surf. Sci.* 253 (2006) 2003-2010.
- Z. Yuan, X.D. Li, Porous PVDF/TPU blends asymmetric hollow fiber membranes prepared with the use of hydrophilic additive PVP (K30), *Desalination* 223(2008) 438-447.