

MINIMISASI LAJU ALIR AIR LIMBAH PADA UNIT PENGOLAHAN DENGAN MENGGUNAKAN METODA *WATER PINCH*

Ellina Sitepu Pandebesie¹⁾, Tri Widjaya¹⁾, Chin-Shin J. Liu²⁾, dan Renanto Handogo¹⁾
¹⁾Jurusan Teknik Kimia, ITS, Surabaya
²⁾Department of Chemical Engineering, NTUST, Taiwan
Telp. 031-5948886
email: ellina@its.ac.id

Abstract

In a conventional wastewater treatment, all waste streams are collected in a sump pond and directed to the designated wastewater treatment unit. Actually, a wastewater stream is not necessarily required to be treated in specific process when its quality and quantity as its concentration and flow rate are already low. The wastewater can directly bypass to other unit process. A method, which was called Water Pinch Analysis to determine the minimum flow rate, was applied in this investigation. Initially a target of minimum flow rate was made including composite curve. Afterward, a *pinch* point was located and its tangent to the curve was drawn to get maximum concentration of the waste entering the wastewater treatment unit. The result showed that for multi contaminant and one treatment unit, a minimum flow rate of 44.14 ton per hour was found or a reduction of 5.5% from its maximum flow rate of 52 tons per hour. An output concentration of 66.08 mg/L at the wastewater treatment was obtained, which is above the tolerance limit. Multi contaminant and multi treatment unit showed a flow rate reduction of 51,6% of Unit Treatment I and of 23,3% of Unit Treatment II. The effluent concentrations were of 36 mg/L COD and 13,86 mg/L ammonia. This results were below the industrial wastewater standards.

Key words: minimization, water pinch analysis, wastewater treatment

1. PENDAHULUAN

Metoda konvensional pengolahan air limbah industri dilakukan dengan cara mengumpulkan seluruh aliran air limbah di bak penampung, kemudian dialirkan ke unit-unit pengolahan yang telah ditentukan. Pengolahan konvensional hanya memindahkan masalah dengan mengubah dari suatu fasa ke fasa lain (Smith, 1995), di mana hasil pengolahan seperti lumpur, memerlukan pengolahan lebih lanjut, yang pengolahannya bisa saja lebih rumit dan memerlukan biaya yang lebih mahal. Di samping itu, seiring dengan peningkatan kapasitas produksi, kapasitas air limbah yang dibuang ke lingkungan juga akan terus meningkat. Sehubungan dengan hubungan yang linier antara kapasitas pengolahan air limbah dan biaya pengolahannya, maka peningkatan kapasitas pengolahan akan meningkatkan biaya pengolahan. Pada

gilirannya, peningkatan kapasitas ini juga akan menimbulkan masalah beban lingkungan, karena beban limbah yang dibuang ke alam tidak dapat dipulihkan secara sempurna. Agar tercapai keberlanjutan proses industri, sudah saatnya menggunakan kembali hasil pengolahan air limbah, sehingga seminimal mungkin membebani alam.

Mulai tahun 1994, Wang dan Smith memperkenalkan metoda desain untuk pemakaian kembali/*reuse* air proses semaksimal mungkin. Prinsipnya, efluen dari suatu unit proses digunakan kembali pada unit proses lainnya, selama proses berikutnya masih dapat menerima konsentrasi efluen dari proses sebelumnya dan laju alir minimal ke unit proses tersebut juga terpenuhi. Pendekatan yang dibuat berupa metoda grafis, dengan menerapkan analogi teknologi *pinch* pada jaringan penukar panas. Kurva

komposit yang dibentuk, merupakan kurva antara massa vs konsentrasi kontaminan. Kurva yang terbentuk akan membentuk konkaf, di mana titik terendah dari konkaf merupakan titik *pinch*-nya. Kemudian ditarik garis singgung melalui titik *pinch*, garis singgung ini tidak boleh memotong kurva komposit. Seluruh area di bawah garis singgung ini merupakan area *feasible*, di mana semakin curam garis singgung yang dibuat, semakin minimal laju alir yang diperlukan. Garis singgung ini merupakan garis kebutuhan air minimal.

Kemudian metoda ini dikembangkan dalam distribusi air limbah pada unit pengolahan untuk meminimasi laju alir yang masuk ke unit pengolahan. Pendekatan yang digunakan juga metoda grafis, di mana dari kurva komposit yang terbentuk ditentukan titik *pinch*-nya. Kemudian ditentukan garis pengolahan minimalnya, yaitu garis singgung yang melalui titik *pinch*. Sehubungan dengan laju alir berbanding lurus dengan kapasitas pengolahan air limbah, maka reduksi laju alir akan mereduksi kapasitas pengolahan sama besarnya.

Kuo dan Smith (1997) mengembangkan desain distribusi air limbah untuk satu kontaminan dan satu unit pengolahan, serta multi kontaminan dan multi pengolahan dengan metoda *water pinch*. Metoda ini digunakan untuk mendistribusikan air limbah, berapa yang harus masuk ke unit pengolahan dan berapa laju alir yang dapat di-*bypass* langsung ke unit pengolahan selanjutnya atau dibuang langsung ke badan air penerima. Strategi yang digunakan untuk aliran dengan konsentrasi di atas titik *pinch* seluruhnya masuk ke unit pengolahan, konsentrasi aliran pada titik *pinch* sebagian diolah dan untuk konsentrasi di bawah titik *pinch* dapat dibuang langsung ke badan air atau unit pengolahan berikutnya.

Untuk meminimisasi air limbah diperlukan metoda yang spesifik, karena berdasarkan fakta di lapangan tidak semua operasi

merupakan proses perpindahan masa, seperti keperluan air untuk air pendingin dan *steam*. Karena tidak seluruh sumber air limbah mempunyai konsentrasi kontaminan yang tinggi, maka dapat dilakukan pendistribusian air limbah. Untuk meminimisasi produksi air limbah dapat digunakan *water pinch analysis* dan model matematika (Argaez, Kokossis dan Smith, 1998).

Huang, Yang dan Lou (2000) menggunakan pendekatan *non linier programming* (NLP) untuk sintesa integrasi jaringan pemakaian air dan pengolahan limbah. Model yang dikembangkan Huang ini dapat menyelesaikan metoda *water pinch* yang diintegrasikan dengan pendekatan matematis. Pada tahun yang sama penelitian pada pabrik tapioka dengan menggunakan metoda *mass exchanged networks* (MENs) dan teknik optimasi NLP untuk mengelola pemakaian air dan air limbah. Pada penelitian ini, diasumsikan hanya satu kontaminan yang dominan, yang dinyatakan dalam besaran COD. Hasil penelitian menunjukkan dapat menurunkan pemakaian air sebesar 13,22% (Srinophakun, Suriyapraphadilok dan Tia, 2000).

Bagajewicz dan Savelski (2001) memperkenalkan formula LP untuk memperoleh hasil yang optimal untuk satu kontaminan dan seri MILP untuk merancang beberapa alternatif jaringan air. Ujang, Wong dan Manan (2002) melakukan penelitian untuk meminimasi kebutuhan air industri dengan menggunakan metoda *Water Pinch Analysis*. Studi ini menunjukkan bahwa pendekatan regenerasi dan *reuse* dapat efektif memaksimalkan pemakaian kembali air limbah sebesar 50%.

Lovelady (2005), melakukan penelitian dengan pendekatan transfer massa. Penelitian ini mempertimbangkan juga elemen yang tidak bereaksi dalam proses. Semakin meningkatnya pemakaian air kembali, atau sistem sebagian atau seluruhnya tertutup, akan menghasilkan akumulasi elemen-

elemen yang tidak ikut dalam proses. Elemen ini antara lain Al, Si, K, Cl, Mg, Mn, *suspended solid*, padatan terlarut dan polutan lainnya. Hal ini akan menyebabkan korosi meningkat, penyumbatan, *scaling* dan deposit, sehingga harus ikut dipertimbangkan dalam merancang jaringan air. Model matematika dan strategi alokasi diselesaikan dengan program Lingo. Dalam penelitiannya dikembangkan juga konsep proses integrasi pada pabrik pulp dan kertas sampai strategi optimal operasional dan kontrolnya.

Pemakaian kembali efluen di samping dapat mereduksi kebutuhan air juga sangat ramah terhadap lingkungan. Hal ini akhirnya akan mereduksi biaya investasi, operasi dan pemeliharaan sehubungan dengan pembelian sumber air dan pengolahan air limbah. Tetapi untuk mencapai *zero liquid discharge* dengan kemurnian sesuai dengan kebutuhan operasi, dibutuhkan biaya retrofit yang lebih besar (Savelski et.al, 2003). Menurut Bagajewicz (2000) *zero liquid discharge* tidak mungkin untuk dilaksanakan, karena diperlukan biaya yang sangat besar, karena kualitas yang harus dicapai sangat tinggi. Zamora, Hernandez-Suarez dan Castellanos-Fernandez (2004) mengembangkan metoda optimasi untuk distribusi efluen air limbah dengan menggunakan metoda optimasi global. Metoda ini dapat menyelesaikan masalah jaringan yang kompleks secara simultan, sehingga akan diperoleh hasil yang *robust* untuk berbagai skenario rancangan jaringan air.

Pada penelitian ini akan dilakukan aplikasi metoda *water pinch* pada industri amoniak, di mana kontaminan dominan yang diteliti adalah COD dan NH_3 dengan dua unit pengolahan. Batasan yang diaplikasikan adalah efisiensi removal unit pengolahan dan konsentrasi efluen harus memenuhi baku mutu air limbah yang berlaku. Tujuan penelitian ini adalah meminimasi laju alir efluen yang harus diolah menggunakan metoda *Water Pinch Analysis* dan merancang struktur jaringan distribusi efluen.

2. METODOLOGI

Pengumpulan Data dan Identifikasi Konstrains

Secara umum, penelitian akan dilakukan dengan mengumpulkan data sekunder dari pabrik/lapangan, kemudian dilakukan analisis aliran air limbah untuk mendistribusikan air limbah ke unit-unit pengolahan. Analisis dilakukan dengan metoda *water pinch* dan hasilnya digunakan untuk merancang struktur jaringan air limbahnya. Data yang dikumpulkan antara lain: neraca air, sumber air limbah, laju alir masing-masing aliran dan konsentrasi kontaminan masing-masing aliran, efisiensi pengolahan setiap unit pengolahan

Identifikasi konstrain dilakukan untuk semua unit pengolahan, berapa konsentrasi kontaminan maksimum yang boleh masuk unit pengolahan, di mana konsentrasi ini disesuaikan dengan efisiensi pengolahan masing-masing unit pengolahan. Konsentrasi maksimum efluen yang dibuang ke badan air harus sesuai dengan standar baku mutu yang berlaku. Pada penelitian ini, fluktuasi konsentrasi kontaminan yang akan diolah dibatasi oleh konsentrasi maksimum yang diijinkan masuk ke unit pengolahan.

Analisis Laju alir Air Limbah Minimal (*Wastewater Targeting*)

Pendekatan *pinch analysis* digunakan untuk menentukan laju alir air limbah minimal yang harus masuk ke unit pengolahan. Analisis dilakukan dengan membuat kurva komposit yang terbentuk dari konsentrasi vs *mass pickup* (mc). Dari kurva komposit ini ditentukan titik *pinch*nya. Penentuan titik *pinch* pada satu unit pengolahan dengan menetapkan titik terendah pada kurva komposit. Titik *pinch* akan menunjukkan besaran mc dan konsentrasi, sehingga laju alir minimal dapat dihitung. Sebagai batasan pada penentuan konsentrasi maksimum yang dapat masuk ke unit pengolahan adalah konsentrasi efluen yang sama dengan standar baku mutu air limbah dan efisiensi

pengolahan unit pengolahannya. Sebagai contoh, jika konsentrasi efluen maksimum 50 mg/L dan efisiensi pengolahannya 0,7, maka konsentrasi maksimum yang masuk ke unit pengolahan adalah 167 mg/L. Unjuk kerja proses pengolahan efluen biasanya ditentukan dengan rasio *removal*nya (Smith, 2005) sebagai berikut:

$$R = \frac{\text{massa kontaminan yang dihilangkan / removed}}{\text{massa kontaminan masuk}}$$

$$R = \frac{mw_{in} C_{in} - mw_{out} C_{out}}{mw_{in} C_{in}}$$

Keterangan:

R = rasio removal

mw_{in} = laju alir inlet (ton/jam)

mw_{out} = laju alir outlet (ton/jam)

C_{in}, C_{out} = konsentrasi inlet (mg/L)

C_{in}, C_{out} = konsentrasi outlet (mg/L)

Karena pada umumnya tidak terjadi perubahan laju alir masuk dan ke luar, maka persamaan di atas menjadi:

$$R = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}}$$

Hubungan *mass pickup*, *mass flowrates* dan konsentrasi dinyatakan sebagai berikut:

$$mc = mw\Delta C$$

Keterangan:

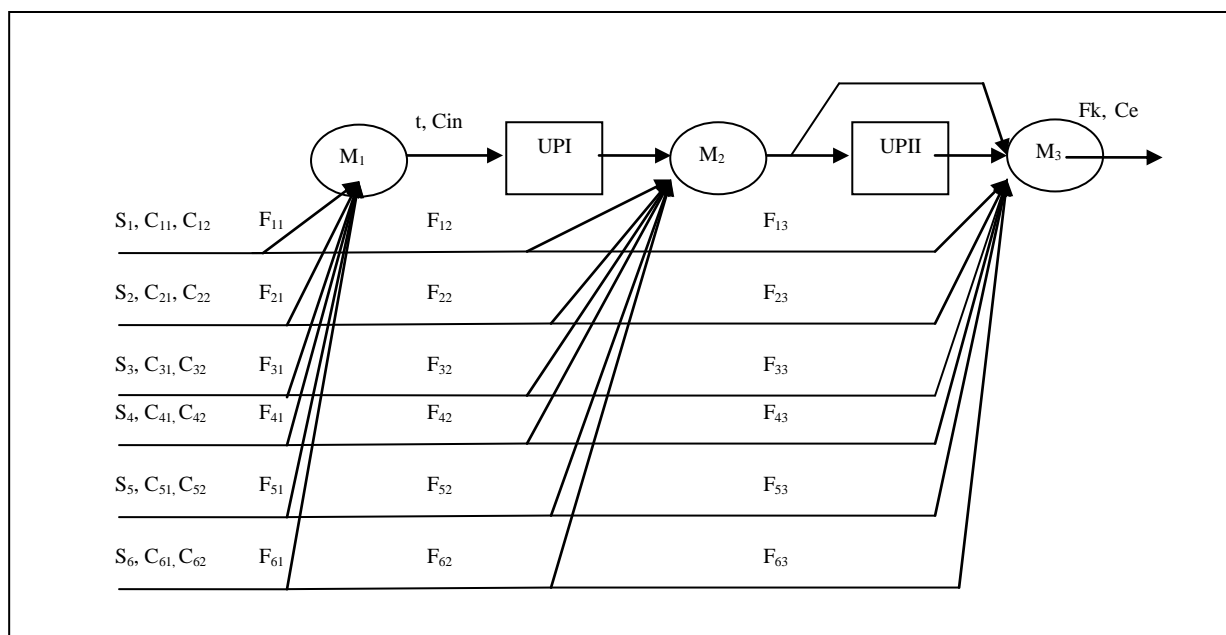
mc = *mass pick-up contaminant* (g/jam)

mw = laju alir (ton/jam)

ΔC = perbedaan konsentrasi inlet dan outlet (mg/L)

Rancangan Superstruktur untuk Aliran Air Limbah Minimum

Superstruktur adalah salah satu cara untuk menghubungkan berbagai struktur dalam jaringan. Analisis secara grafis dengan berbagai kondisi batas dibuat sebelum dilanjutkan dengan desain jaringan air. Hasil yang diperoleh dari metoda *water pinch* digunakan untuk merancang struktur jaringan air limbahnya dengan diagram grid. Untuk mendapat rancangan yang optimum, konsentrasi efluen yang dibuang ke badan air harus memenuhi standar baku mutu air limbah. Rancangan struktur jaringan distribusi air limbah yang mungkin terjadi disajikan pada Gambar 1.



Keterangan gambar:

S_1 : Aliran air limbah 1

$S_1 = F_{11} + F_{12} + F_{13}$

$t = F_{out}$

F_{11} : Aliran air limbah 1 yang mungkin masuk ke Unit Pengolahan

F_{12} : Aliran air limbah 1 yang mungkin dapat dibypass

C_{11} :Konsentrasi Kontaminan 1 air limbah 1

C_{12} :Konsentrasi Kontaminan 2 air limbah 1

M : pencampuran aliran

UP : Unit Pengolahan

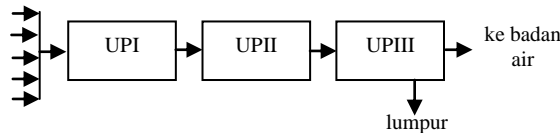
C_e : Konsentrasi efluen memenuhi baku mutu

Gambar 1. Konfigurasi Superstruktur Distribusi Air Limbah ke Unit Pengolahan Air Limbah

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Eksisting

Kondisi eksisting instalasi pengolahan air limbah yang akan ditinjau dapat dilihat pada Gambar 2. Ada 6 sumber air limbah yang masuk ke Unit Pengolahan I (UPI), di mana seluruh aliran sumber air limbah langsung masuk ke UPI.



Gambar 2. Diagram Alir Unit Pengolahan Air Limbah

Karakteristik masing-masing air limbah bervariasi dari konsentrasi tertinggi sebesar 400 mg/L dan terendah 100 mg/L. Setelah melalui Unit Pengolahan, konsentrasi kontaminan yang terdapat di dalam air limbah hasil pengolahan yang dapat dibuang ke badan air (C_{out}) harus memenuhi standar baku mutu air limbah, di mana untuk parameter COD ditetapkan sebesar 50 mg/L dan NH_3 sebesar 20 mg/L. Secara rinci, karakteristik air limbah dapat dilihat pada Tabel 1. Dari UPI, air limbah dialirkan ke Unit Pengolahan II (UPII), kemudian diendapkan di Unit Pengolahan III (UPIII). Lumpur dibuang ke bak pengolah lumpur dan efluennya dapat dibuang ke badan air. Karakteristik pada tiap unit pengolahan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1. Data Aliran Air Limbah

Aliran	NH_3		COD		Laju Alir (ton/jam)
	C_{in} (mg/L)	C_{out} (mg/L)	C_{in} (mg/L)	C_{out} (mg/L)	
1	98	20	400	50	10
2	95	20	250	50	5
3	70	20	210	50	10
4	68	20	180	50	12
5	80	20	120	50	5
6	50	20	100	50	10

Tabel 2. Karakteristik Unit Pengolahan

Unit Pengolahan	Efisiensi Pengolahan (R)	
	NH_3	COD
1 Unit Pengolahan I	0,7	0,7
2 Unit Pengolahan II	0,7	0,7
3 Unit Pengolahan III	0,3	0,3

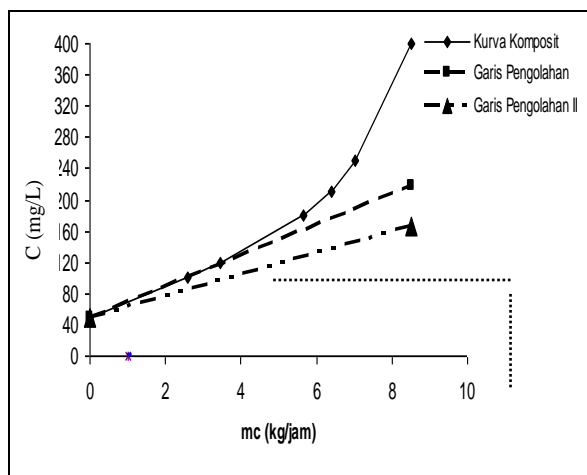
Pada penelitian ini, air limbah mengalami pemisahan (*splitting*) ataupun pencampuran. Air limbah yang harus masuk ke dalam unit pengolahan akan dicampur terlebih dahulu. Jika ada aliran air limbah yang sebagian masuk ke unit pengolahan dan sebagian dapat dialirkan langsung tanpa melalui pengolahan air limbah, maka pada aliran tersebut akan terjadi pemisahan. Kemudian pada titik akhir sebelum air limbah dibuang ke badan air, akan dilakukan pencampuran kembali.

Jika seluruh aliran air limbah dialirkan masuk ke UPI, maka konsentrasi kontaminan COD yang masuk ke UPI menjadi sebesar 213,65 mg/L. Jika R sebesar 0,7, maka konsentrasi efluen menjadi 64,1 mg/L, di mana ini menjadi konsentrasi aliran air limbah yang masuk ke dalam UPII. Jika R pada UPII sebesar 0,7, maka konsentrasi efluen UPII menjadi sebesar 19,22 mg/L, di mana ini menjadi konsentrasi yang masuk ke UPIII. Pada UPIII terjadi pemisahan lumpur dan efluen, sehingga R pada UPIII ini hanya sebesar 0,3. Konsentrasi efluen yang dibuang ke badan air menjadi sebesar 5,76 mg/L. Konsentrasi ini jauh di bawah standar baku mutu yang berlaku. Karena itu, sebenarnya masih ada potensi untuk mereduksi laju alir yang masuk ke UPI, UPII maupun UPIII. Sebagian dari aliran dapat dialirkan langsung tanpa melalui Unit Pengolahan, kemudian dicampurkan kembali dengan efluen hasil pengolahan, untuk dibuang ke badan air. Sebagai konstrainnya, konsentrasi masuk maksimum dan seluruh efluen yang dibuang ke badan air harus memenuhi standar baku mutu air limbah yang berlaku.

Penentuan Laju Alir Minimum untuk Multi Kontaminan dan Satu Unit Pengolahan

Penentuan target kapasitas minimum dilakukan dengan metoda *water pinch*. Dari Tabel 1 dibuat kurva masing-masing aliran air limbah. Dari kurva individual ini ditentukan interval konsentrasi, untuk membuat kurva kompositnya. Untuk

menentukan *slope* masing-masing interval konsentrasi tersebut, dihitung dari kumulatif laju alir pada interval konsentrasi yang ditentukan berdasarkan konsentrasi masuk kontaminan COD (C_{in}). Kemudian dari hasil perhitungan dibuat kurva kompositnya (Gambar 3).



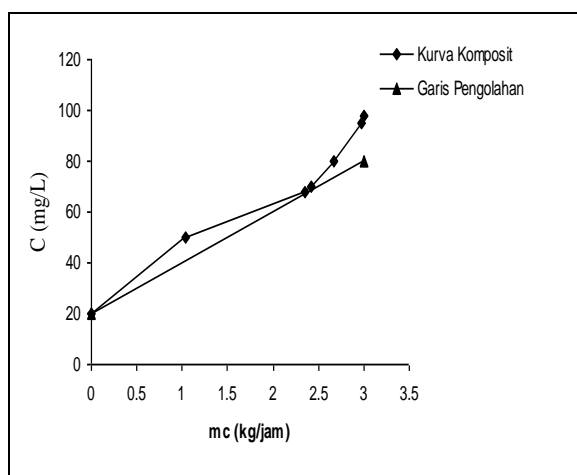
Gambar 3. Kurva Komposit Parameter COD

Untuk memperoleh laju alir minimal, garis pengolahan yang merupakan garis singgung pada titik *pinch* dibuat securam mungkin. Dari garis pengolahan ini diperoleh titik *pinch* berada pada konsentrasi 120 mg/L dan mc sebesar 3,44 ton/jam. Perhitungan dengan menggunakan rumus (4), pada konsentrasi 120 mg/L dan mc sebesar 3,44 ton/jam, maka diperoleh mw_{min} sebesar 49,14 ton/jam, atau dapat mereduksi laju alir sebesar 2,86 ton/jam (5,5%) dari laju alir total sebesar 52 ton/jam. Laju alir sebesar 2,86 ton/jam dialirkan langsung tanpa melalui Unit Pengolahan, kemudian dicampurkan dengan efluen unit pengolahan, kemudian dialirkan ke badan air. Kapasitas pengolahan ditentukan oleh waktu tinggal air limbah dalam unit pengolahan dan berbanding lurus dengan laju alir. Karena itu, minimasi laju alir sebesar 5,5% akan mengurangi kapasitas pengolahan sebesar 5,5% juga.

Jika ditarik garis dari konsentrasi 50 mg/L melalui titik *pinch*, maka dari garis pengolahan dapat diketahui konsentrasi maksimum yang diijinkan masuk ke dalam Unit Pengolahan sebesar 218 mg/L. Jika R

sebesar 0,7, maka konsentrasi efluen hasil pengolahan menjadi 65,4 mg/L, di mana hasil ini masih di atas standar baku mutu air limbah yang berlaku. Untuk memperoleh konsentrasi efluen hasil pengolahan sebesar 50 mg/L, maka konsentrasi maksimum yang diijinkan masuk ke dalam Unit Pengolahan harus di bawah 218 mg/L, atau sebesar 167 mg/L, seperti yang ditunjukkan pada garis pengolahan II. Ini berarti, untuk kasus ini tidak terbentuk titik *pinch*. Jika tidak terbentuk titik *pinch*, maka seluruh aliran air limbah harus masuk ke unit pengolahan. Jika seluruh air limbah masuk ke unit pengolahan, seperti yang telah dijelaskan di atas, maka konsentrasi efluennya sebesar 64,1 mg/L yang juga tidak memenuhi standar baku mutu air limbah.

Batasan konsentrasi masuk unit pengolahan dan unjuk kerja unit pengolahan menyebabkan pengolahan air limbah dengan satu unit pengolahan tidak mencapai standar baku mutu yang berlaku. Untuk mengatasi hal tersebut, perlu dilakukan pengolahan lanjutan untuk efluen unit pengolahan tersebut. Hal yang sama dilakukan untuk NH_3 dan hasil yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Kurva Komposit Parameter NH_3

Dari garis pengolahan NH_3 diperoleh titik *pinch* berada pada konsentrasi 68 mg/L dan mc sebesar 2356 kg/jam. Perhitungan dengan menggunakan rumus (4), maka diperoleh mw_{min} sebesar 49,08 ton/jam, atau dapat

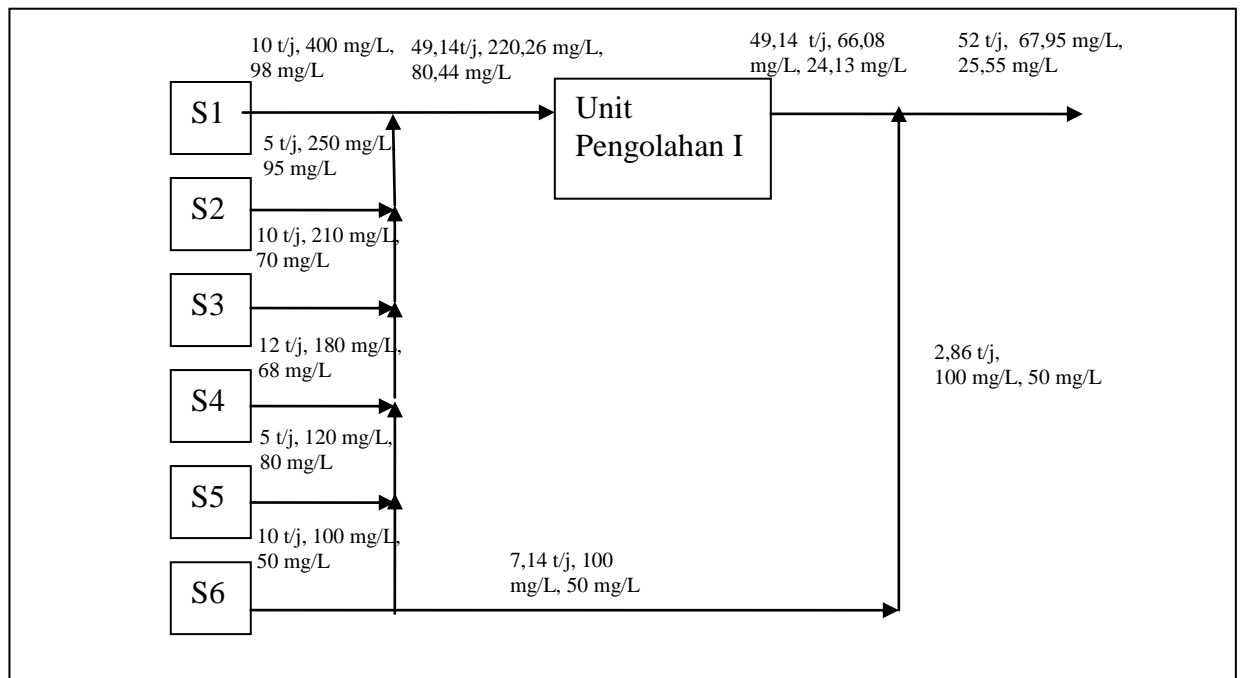
mereduksi laju alir sebesar 2,92 ton/jam (5,6%) dari laju alir total sebesar 52 ton/jam. Konsentrasi masuk maksimum yang ditunjukkan kurva komposit adalah 80 mg/L. Jika efisiensi removal unit pengolahan sebesar 0,7, maka konsentrasi efluen menjadi 24 mg/L, sedikit di atas baku mutu. Jika ingin meminimasi laju alir ke unit pengolahan I, maka masih diperlukan pengolahan lanjutan untuk mencapai baku mutu air limbah yang diijinkan.

Untuk memenuhi unjuk kerja *removal* unit pengolahan, maka dipilih laju alir yang lebih

besar untuk kebutuhan pengolahan masing-masing parameter pencemar. Hasil perhitungan menunjukkan kebutuhan laju alir pengolahan COD lebih besar dari laju alir pengolahan NH₃, maka laju alir minimal sebesar 49,14 ton/jam.

Superstruktur Jaringan Aliran Air Limbah Ke Satu Unit Pengolahan

Setelah memperoleh laju alir ke unit pengolahan minimum, selanjutnya adalah bagaimana rancangan strukturnya agar target ini dapat tercapai. Hasil rancangan diperoleh seperti yang dapat dilihat pada Gambar 5.



Keterangan Gambar: 10 t/j, 100 mg/L, 50 mg/L = Laju alir aliran 6, Konsentrasi COD aliran 6 dan Konsentrasi NH₃ aliran 6

Gambar 5. Rancangan Struktur untuk Mencapai Target Efluen Minimum

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa efisiensi pengolahan menjadi batasan untuk mencapai target konsentrasi sesuai dengan standar baku mutu air limbah. Ini berarti, untuk mencapai target tersebut diperlukan unit pengolahan lanjutan.

Unit pengolahan dengan proses yang berbeda diperlukan untuk mengolah efluen pada konsentrasi yang tinggi atau efluen mengandung bermacam-macam kontaminan. Di samping itu, biasanya lebih murah mengkombinasikan beberapa unit

pengolahan daripada menggunakan satu unit pengolahan saja. Proses UPI tidak dapat diharapkan menurunkan konsentrasi kontaminan sampai standar baku mutu yang berlaku. Kondisi tersebut akan sulit dicapai, apalagi pada umumnya, karakteristik efluen berfluktuasi. Oleh karena itu perlu proses pengolahan lebih lanjut.

Pada multi proses dapat ditemukan beberapa garis pengolahan. Hal ini terjadi karena keterbatasan efisiensi masing-masing unit pengolahan. Jika konsentrasi efluen suatu

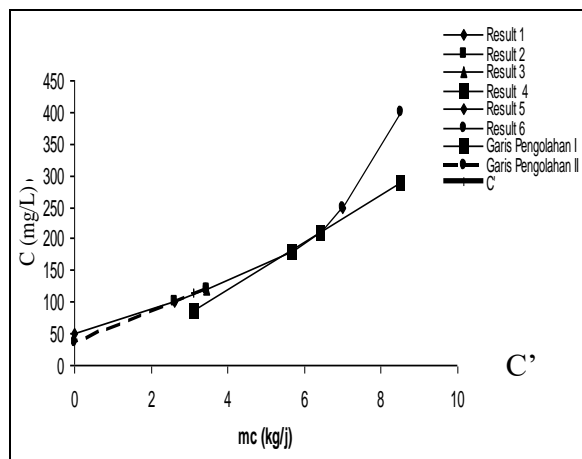
unit pengolahan masih di atas baku mutu efluen air limbah, maka masih diperlukan unit pengolahan lanjutan, begitu seterusnya sampai standar baku mutu dapat dicapai. Setiap garis pengolahan dibuat perbagian yang merupakan garis singgung pada titik terendah masing-masing bagian tersebut, yang tidak boleh memotong kurva komposit. Untuk memperoleh laju alir minimum, garis singgung dibuat securam mungkin. Garis pengolahan secara keseluruhan jika digabungkan tidak boleh memotong kurva komposit.

Pendekatan grafis pada pentargetan laju alir air limbah minimum dapat dikembangkan menjadi kurva komposit multi unit pengolahan. Kurva komposit efluen dibagi menjadi dua bagian sesuai dengan unit pengolahan yang ada. Masing-masing garis pengolahan mewakili besaran pengolahan yang dapat dilakukan satu unit pengolahan. Dalam hal ini, unit pengolahan yang dirancang untuk menurunkan kandungan COD dan NH_3 adalah UPI dan UPII.

Kurva komposit diperoleh seperti yang dapat dilihat pada Gambar 6. Garis pengolahan ditarik pada titik terendah bagian pertama, ditarik sampai konsentrasi yang dapat dicapai unit pengolahan, seperti yang dapat dilihat pada garis pengolahan I. Konsentrasi masuk maksimum pengolahan I sebesar 288 mg/L dan jika efisiensi pengolahannya 0,7, maka konsentrasi keluarnya (C_1') sebesar 86,5 mg/L. Kemudian ditarik garis pengolahan II. Konsentrasi masuk maksimum ke pengolahan II adalah konsentrasi campuran efluen dari pengolahan I dan aliran air limbah yang belum diolah. Jika dimasukkan kembali ke dalam grafik, maka garis pengolahan untuk UPI dan UPII dapat dilihat pada Gambar 7.

Dari Gambar 7 juga dapat dilihat dari titik konsentrasi maksimum garis pengolahan I sampai titik konsentrasi keluar garis pengolahan menghasilkan m_c sebesar 5,41 kg/jam. Jika dihitung maka dihasilkan laju alir minimal ($m_{w_{\min}}$) sebesar 26,84 ton/jam,

atau reduksi sebesar 51,6% dari laju alir total sebesar 52 ton/jam. Karena laju alir berbanding lurus dengan kapasitas pengolahan, maka minimasi laju alir ini juga akan mengurangi kapasitas pengolahan sebesar 51,6%.



Gambar 7. Garis Pengolahan Pada Dua Unit Pengolahan

Setelah UPI, konsentrasi dan laju alirnya berubah. Jika konsentrasi kontaminan yang akan diolah di UPII merupakan campuran C_1' dan C_4 , C_5 serta C_6 yang di-bypass dari UP I, maka diperoleh C campuran (C') sebesar 110,6 mg/L, di mana konsentrasi ini di bawah kurva komposit dan dari grafik diperoleh nilai m_c sebesar 3,1 kg/jam. Jika konsentrasi influen maksimum 110,6 mg/L dan efisiensi pengolahan sebesar 0,7, maka konsentrasi efluennya menjadi sebesar 33,3 mg/L. Pada m_c sebesar 3,1 kg/jam, maka m_w minimum diperoleh sebesar 39,9 ton/jam, atau reduksi sebesar 23,3% dari total laju alir sebesar 52 ton/jam.

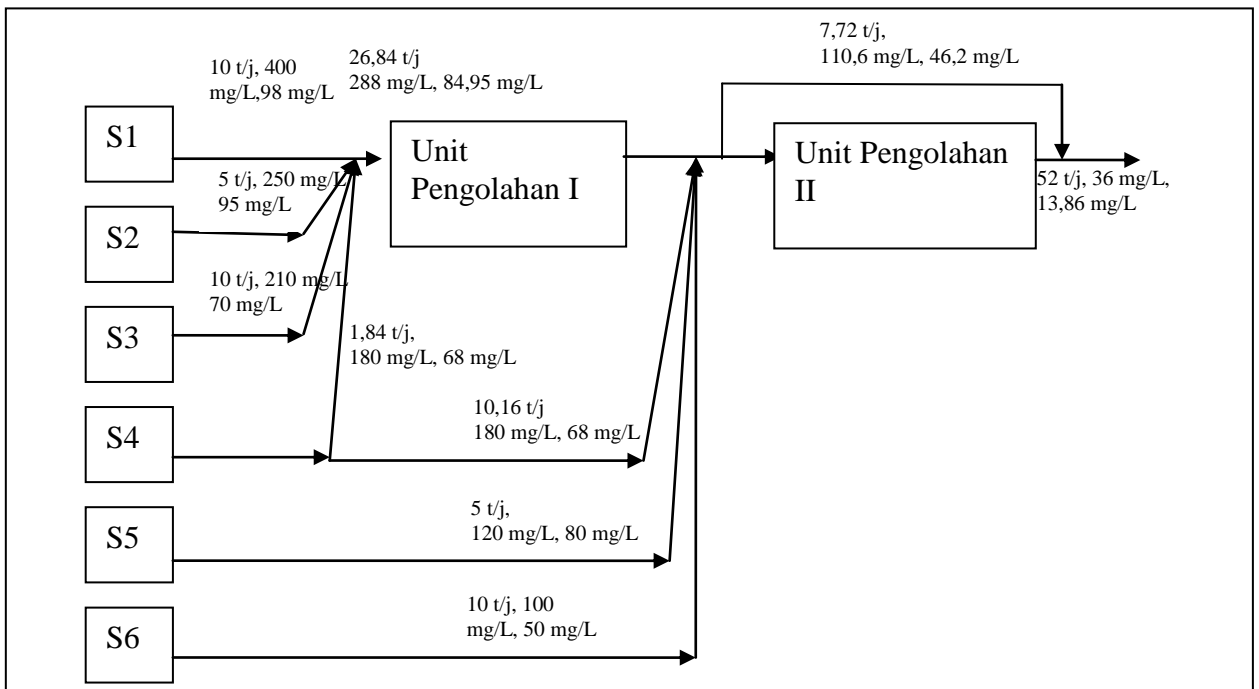
Jika batas maksimum efluen yang dibuang ke badan air yang diijinkan sebesar 50 mg/L dan efisiensi pengolahan sebesar 0,7 maka konsentrasi maksimum masuk sebenarnya boleh sebesar 165 mg/L. Prinsipnya tetap garis pengolahan tidak boleh memotong kurva komposit. Karena itu garis pengolahan II dapat ditarik melalui titik konsentrasi 120 mg/L yang merupakan garis paling curam yang tidak memotong kurva komposit. Konsentrasi masuk maksimum garis

pengolahan II menjadi sebesar 120 mg/L. Pada efisiensi pengolahan 0,7, konsentrasi keluar menjadi 36 mg/L. Pada mc sebesar 3,1 kg/jam, dihasilkan laju alir minimal ($m_{w_{min}}$) sebesar 36,9 ton/jam, lebih kecil dari pada alternatif I, yaitu konsentrasi masuk sebesar 110,6 mg/L. Hasil ini menunjukkan reduksi sebesar 29% dari total laju alir sebesar 52 ton/jam. Untuk parameter NH_3 , jika laju alir yang masuk ke UPI sebesar 26,84 ton/jam, maka konsentrasi masuk UPI menjadi sebesar 84,95 mg/L dan konsentrasi efluen sebesar 25,48 mg/L. Jika laju alir masuk UPII sebesar 39,9 ton/jam, maka konsentrasi masuk UPII=46,2 mg/L dan konsentrasi keluar menjadi 13,86 mg/L. Hasil tersebut jauh di bawah baku mutu air limbah.

Sebenarnya laju alir masih dapat diminimasi sampai batas efluen yang dibuang ke badan air 50 mg/L untuk COD dan 20 mg/L untuk NH_3 . Kesulitan dari metoda grafis ini adalah diperlukan *trial and error* untuk menghasilkan laju aliran optimal, karena tidak mempertimbangkan batasan konsentrasi efluen yang dapat dibuang ke badan air penerima.

Superstruktur Multi Kontaminan dan Multi Unit Pengolahan

Setelah memperoleh laju alir pengolahan minimum untuk masing-masing unit pengolahan, dilakukan perancangan struktur jaringan air pendinginnya seperti yang dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Rancangan Superstruktur Jaringan Pendingin Multi Kontaminan dan Multi Pengolahan

4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa pada kasus multi kontaminan dan satu unit pengolahan menunjukkan pengurangan laju alir dari 52 ton/jam menjadi 49,14 ton/jam atau sebesar 5,5%. Sehubungan laju alir berbanding lurus dengan kapasitas pengolahan, maka hal ini sama dengan mereduksi kapasitas pengolahan sebesar

5,5%. Konsentrasi kontaminan rancangan yang dibuang ke badan air sebesar 67,95 mg/L, di mana angka ini masih melebihi standar baku mutu air limbah. Untuk mencapai batasan standar yang berlaku, diperlukan pengolahan lanjutan.

Untuk rancangan multi kontaminan dan multi pengolahan diperoleh hasil, laju alir yang masuk ke unit Pengolahan I dapat direduksi

sebesar 51,6% dan ke Unit Pengolahan II sebesar 23,3%. Konsentrasi efluen yang dibuang ke bak pengendap untuk COD sebesar 36 mg/L dan NH₃ sebesar 13,86 mg/L, di mana hasil ini sudah di bawah standar baku mutu air limbah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada DIKTI Departemen Pendidikan Nasional yang telah mendanai penelitian ini dengan Nomor Kontrak 037/SP2H/PP/DP2M/2007, Tanggal 29 Maret 2007.

DAFTAR PUSTAKA

Alva-Argaez, A., A.C. Kokossis dan R. Smith. (1998). Wastewater Minimisation of Industrial Systems Using An Integrated Approach, *Computers and Chemical Engineering*. 22. Suppl. pp. S741-S744.

Bagajewicz, M. (2000). A Review of Recent Design Procedures for Water Networks in Refineries and Process Plants, *Computers and Chemical Engineering*, 24. pp.2093-2113.

Bagajewicz, M. dan Savelski, M. (2001). On The Use of Linear Models for The Design of Water Utilization Systems in Process Plants With A Single Contaminant, *Trans I Chemical Engineering*. 79. pp. 600-610.

Huang, Yang dan Lou (2000). Synthesis of an Optimal Wastewater Reuse Network, *Waste Management*. 20. pp 311-319.

Kuo, W.C.J dan Smith, R. (1997). Effluent Treatment System Design, *Chemical Engineering Science*. 52. 4273-4290.

Lovelady, E.M dan El-Halwagi M.M. (2005).

An Integrated Approach to The Optimization of Water Usage and Discharge in Pulp and Paper Plants, Chemical Engineering Department, Texas A&M University, College Station, TX 77843

Savelski M. J., Anantha P.R. Koppol, Miguel J. Bagajewicz dan Brian J. Dericks. (2003). On Zero Water Discharge Solutions in The Process Industry, *Advances in Environmental Research*. 8. 151-171.

Smith, R., (1995). Chemical Process, John Wiley and Sons, England.

Smith, R., (2005). Chemical Process Design and Integration, John Wiley and Sons, England.

Srinophakun T, U. Suriyaphadilok dan S. Tia. (2000). Water-Wastewater Management of Tapioca Starch Manufacturing Using Optimization Technique. *Science Asia*. 26. 57-67.

Ujang, Z., C.L. Wong, dan Z.A. Manan, (2002). Industrial Wastewater Minimization Using Water Pinch Analysis: A Case Study on An Old Textile Plant, *Water Science and Technology*. 46. pp. 77-84.

Wang, Y. P. and R. Smith. (1994). Wastewater Minimization, *Chemical Engineering Science*. 49. No. 7. pp. 981-1006.

Zamora J.M., R. Hernandez-Suarez dan J. Castellanos-Fernandez, (2004). Superstructure Decomposition And Parametric Optimization Approach For The Synthesis Of Distributed Wastewater Treatment Networks, *Ind. Engineering Chem. Res*. 43. pp. 2175-2191.