

PENGARUH FAKTOR RELAKSASI TERHADAP KEAKURATAN SOLUSI NUMERIK PROBLEM ALIRAN AIRTANAH AQUIFER TERTEKAN

Azwa Nirmala

Staf Pengajar Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil Universitas Tanjungpura

ABSTRAK

Untuk mengantisipasi dampak negatif yang timbul akibat eksploitasi airtanah yang berlebihan, harus dipelajari terlebih dahulu fenomena skala regional aliran airtanah. Untuk mempelajari hal tersebut dapat digunakan model matematika numerik sebagai alat prediksi dan analisis. Pada tahap akhir langkah penyelesaian model numerik aliran airtanah aquifer tertekan ini, akan dihasilkan suatu persamaan linier, yang kemudian akan dipecahkan untuk mendapatkan solusi, dengan menggunakan metode iterasi. Metode iterasi ini biasanya selalu menggunakan faktor relaksasi, R_E , yang digunakan untuk mempercepat pencapaian konvergensi solusi. Faktor relaksasi ini tidak dapat diambil sembarang karena akan mempengaruhi keakuratan solusi. Pada penelitian ini dicoba digunakan faktor relaksasi dari 0,1 s.d. 2,0, yang diterapkan pada kasus pemompaan satu sumur dan kasus pemompaan banyak sumur. Hasilnya yang disebut sebagai hasil numerik dan kemudian dibandingkan dengan nilai analitiknya, ternyata menunjukkan bahwa faktor relaksasi yang digunakan, sebaiknya diambil antara 1,0 s.d. 1,5 yang ditunjukkan dengan angka koreksinya terhadap analitik yang relatif kecil. Penggunaan faktor relaksasi antara 1,6 s.d. 1,8 menghasilkan angka koreksi yang mulai meningkat lagi dan penggunaan faktor relaksasi di atas 1,8 menyebabkan skema iterasi menjadi tidak konvergen sehingga ketepatan (*accuracy*) yang kita syaratkan pada awal simulasi tidak akan pernah tercapai.

Kata-kata kunci: aquifer, model numerik, faktor relaksasi

Pendahuluan

Penggunaan airtanah dewasa ini telah merupakan hal yang lazim, terutama dikota-kota besar. Hal ini dikarenakan beberapa sebab seperti sumber air permukaan yang ada tidak mencukupi kebutuhan, sumber air permukaan yang ada tidak memenuhi standart air bersih yang layak pakai

atau mungkin juga jika dilihat dari segi ekonomis, pendistribusian air permukaan sampai ke tempat kebutuhan, menghabiskan biaya yang sangat mahal. Akibat peningkatan penggunaan airtanah ini, mau tidak mau kita harus mempelajari sifat-sifat dari aquifer tsb sebagai penghasil airtanah, dengan

cara memprediksi reaksi dari aquifer terhadap pemompaan, sebagai langkah antisipasi terhadap dampak negative yang mungkin timbul. Untuk memprediksi ini, kita harus mempelajari fenomena skala regional aliran airtanah, yang biasanya tidak dapat dipelajari dengan model-model fisik skala laboratorium, akan tetapi harus menggunakan matematika sebagai alat prediksi dan analisis.

Menurut cara penyelesaiannya, model matematika terbagi atas model matematika analitik dan model matematika numerik. Model matematika numerik, yang biasanya di-implementasikan ke program komputer, lebih fleksibel untuk digunakan, karena untuk menggunakan model matematika analitik, kita harus mematuhi banyak batasan asumsi persamaan analitiknya.

Pada tahap akhir langkah penyelesaian model numerik aliran airtanah aquifer tertekan ini, akan dihasilkan suatu persamaan linier, yang kemudian akan dipecahkan untuk mendapatkan solusi, dengan menggunakan metode iterasi. Ada beberapa metode iterasi yang dapat digunakan, antara lain adalah iterasi Jacobi dan iterasi Gauss Seidell. Beberapa metode iterasi ini pada umumnya menggunakan faktor relaksasi (*relaxation factor*) R_E untuk mempercepat pencapaian konvergensi solusi.

sedemikian rupa, sehingga jika h^* ini disubstitusi ke persamaan pengatur aliran air tanah yang jenuh pada kondisi tak-tunak, akan meninggalkan

Faktor relaksasi ini tidak dapat diambil sembarang, karena akan mempengaruhi konvergensi solusi. Untuk itu akan dicoba untuk menemukan suatu faktor relaksasi yang tepat, sehingga konvergensi solusi akan tercapai lebih cepat, tanpa mengabaikan keakuratan solusi.

Tujuan Penelitian

Menemukan suatu faktor relaksasi, R_E yang optimal, dengan artian, dengan penggunaan faktor relaksasi tersebut, konvergensi solusi menjadi lebih cepat tercapai dibanding tanpa penggunaan faktor relaksasi, tetapi tetap menjamin akurasi solusi.

Dasar Teori

Metode Galerkin

Salah satu bentuk perumusan metode elemen hingga adalah metode residu berbobot (*method of weighted residual* = MWR). MWR didasarkan pada minimisasi residu (sisa) yang tertinggal setelah setelah suatu solusi pendekatan disubstitusi kedalam persamaan-persamaan diferensial yang mengatur suatu persoalan (*the governing equation*).

Atau dengan kata lain dapat dikatakan bahwa prinsip utama metode residu berbobot yang diterapkan pada persamaan aliran ini adalah mencari suatu solusi pendekatan untuk h yaitu h^* residu yang sangat kecil, hingga mendekati nol.

Secara matematis, ide minimisasi dapat dinyatakan dalam bentuk

$$R\omega_i d\Omega = 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

di mana

R : residu

Ω : domain model

ω_i : fungsi pembobot

Berbagai metode yang termasuk dalam residu berbobot ini yaitu metode kolokasi, subdomain, *least square* dan Galerkin, menggunakan fungsi pembobot yang berbeda. Pada metode Galerkin, sebagai fungsi pembobot adalah fungsi interpolasi itu sendiri yang digunakan untuk mendefinisikan solusi pendekatan h^* .

Model Aliran Tak Tunak dengan Metode Galerkin

Persamaan aliran air tanah yang jenuh, 2D, pada kondisi tak-tunak adalah

$$L(h) = \frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial h}{\partial y} \right) + N - S \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

Dengan memasukkan harga pendekatan untuk h yaitu h^* , Persamaan (2) akan menyisakan suatu residu R dengan persamaan

$$L(h^*) = \frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h^*}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial h^*}{\partial y} \right) + N - S \frac{\partial h^*}{\partial t} = R(x, y, t) \quad (2)$$

Nilai R harus diminimisasi agar $h^* \sim h$, sehingga dengan memasukkan Persamaan (3) ke Persamaan (1)

didapat suatu sistem n persamaan diferensial untuk n head parameter yang tidak diketahui $h_i(t)$ sbb:

$$\int_{\Omega} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial}{\partial x} \sum_{j=1}^n h_j \omega_j \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial}{\partial y} \sum_{j=1}^n h_j \omega_j \right) + N - S \frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{j=1}^n h_j \omega_j \right) \right] \omega_i dx dy = 0 \quad (3)$$

untuk $i = 1, 2, 3, \dots, n$

Menggunakan teorema Green, dua suku pertama dapat diintegrasikan per bagian, menghasilkan

$$\int_{\Omega} \left[-T \frac{\partial}{\partial x} \left(\sum_{j=1}^n h_j \omega_j \right) \frac{\partial \omega_i}{\partial x} - T \frac{\partial}{\partial y} \left(\sum_{j=1}^n h_j \omega_j \right) \frac{\partial \omega_i}{\partial y} \right] dx dy - \int_{\Omega} \left[-S \left(\sum_{j=1}^n \frac{\partial h_j}{\partial t} \omega_j \right) \omega_i + N \omega_i \right] dx dy + \int_{\Gamma} \omega_i \left[\sum_{j=1}^n T \left(\frac{\partial \omega_j}{\partial x} \right) \bar{n}_{\Gamma} h_j \right] ds + \int_{\Gamma} \omega_i \left[\sum_{j=1}^n T \left(\frac{\partial \omega_j}{\partial y} \right) \bar{n}_{\Gamma} h_j \right] ds = 0; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

di mana \bar{n}_{Γ} adalah unit vektor normal terhadap batas Γ .

Dua suku terakhir persamaan sisi kiri sama dengan nol jika node i tidak terletak pada batas Γ . Sedangkan jika

node i terletak pada batas Γ , integral batas dapat dinyatakan sebagai

$$\int_{\Gamma} \omega_i \left[\sum_{j=1}^n T \left(\frac{\partial \omega_j}{\partial x} \right) \bar{n}_{\Gamma} h_j \right] ds + \int_{\Gamma} \omega_i \left[\sum_{j=1}^n T \left(\frac{\partial \omega_j}{\partial y} \right) \bar{n}_{\Gamma} h_j \right] ds = \int_{\Gamma} N_n \omega_i ds \quad (5)$$

di mana N_n adalah aliran arah normal yang melewati batas per-unit panjang batas.

Pada node-node yang terletak pada batas head spesifik (*specified head nodes*) tentu saja berlaku

$$h_i(t) = f(t) \quad (6) \quad (2.2.6)$$

menggantikan kondisi (5).

Jika kita amati Persamaan (5), terlihat bahwa persamaan ini berbentuk

$$\sum_{j=1}^n P_{ij} h_j + \sum_{j=1}^n R_{ij} \frac{\partial h_j}{\partial t} - F_i = 0 \quad (7)$$

atau

$$P(h) + R \frac{\partial h}{\partial t} - F = 0 \quad (8)$$

di mana

$$P_{ij} = \int_{\Omega} \left(T \frac{\partial \omega_i}{\partial x} \frac{\partial \omega_j}{\partial x} + T \frac{\partial \omega_i}{\partial y} \frac{\partial \omega_j}{\partial y} \right) dx dy$$

$$R_{ij} = \int_{\Omega} S \omega_i \omega_j dx dy$$

$$F_i = \int_{\Omega} N \omega_i dx dy + \int_{\Gamma} N_n \omega_i ds$$

Integral lengkapnya merupakan suatu penjumlahan integral-integral per elemen di mana $\omega_i \neq 0$, dan persamaan ke- i dari sistem didapat dengan menjumlahkan seluruh kontribusi elemennya. Dengan memasukkan

$$\omega_i = \sum_{e=1}^m \phi_i^e \quad (9)$$

dan mengintegrasinya per elemen, koefisien-koefisien matriks-matriks elemen yang mengandung node i, j adalah sbb:

$$P_{ij}^e = \int_{e} \left(T^e \frac{\partial \phi_i^e}{\partial x} \frac{\partial \phi_j^e}{\partial x} + T^e \frac{\partial \phi_i^e}{\partial y} \frac{\partial \phi_j^e}{\partial y} \right) dx dy \quad (10)$$

$$R_{ij}^e = \int_{e} S^e \phi_i^e \phi_j^e dx dy \quad (11)$$

$$F_i^e = \int_{\Omega} N \phi_i^e dx dy + \int_{\Gamma^e} N_n \phi_i^e ds \quad (12)$$

dan untuk elemen-elemen lainnya P_{ij}^e, R_{ij}^e dan F_i^e sama dengan nol.

Kemudian untuk mendapatkan solusinya yaitu harga untuk $h_i(t+\Delta t)$, kita lihat lagi Persamaan (9) yaitu

$$P(h) + R \frac{\partial h}{\partial t} - F = 0 \quad (9)$$

Persamaan (9) ini merupakan persamaan differensial biasa yang

bergantung terhadap waktu. Untuk menyelesaikannya harus dilakukan integrasi, yang mana pada penelitian ini akan digunakan pendekatan metode beda hingga untuk menggantikan turunan waktu oleh suatu persamaan beda hingga (*difference quotient*).

Dengan pendekatan beda hingga diketahui

$$\left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\} = \frac{1}{\Delta t} [h(t + \Delta t) - h(t)] \quad (13)$$

Sehingga Persamaan (9), dalam skema implisit penuh (*fully implicit scheme*) berbentuk

$$P[h(t + \Delta t)] + R \{ [h(t + \Delta t) - h(t)] / \Delta t \} - F = 0$$

$$(R/\Delta t + P)[h(t + \Delta t)] = (R/\Delta t)[h(t)] + F \quad (14)$$

Karena R , Δt , P , h_t dan F diketahui, maka Persamaan (15) di atas dapat disederhanakan dalam bentuk

$$[A]\{h\} = [B] \quad (16)$$

di mana

$$A = R/\Delta t + P$$

$$h = h_{t+\Delta t}$$

$$B = (R/\Delta t)h_t + F$$

Persamaan (16) akan diselesaikan dengan metode iterasi Gauss Seidel dengan relaksasi. Sebagai tahap awal iterasi, harus ditetapkan nilai sembarang untuk h , yaitu h_1, h_2, \dots, h_n yang kemudian kita notasikan dengan $h_1^{(k)}, h_2^{(k)}, \dots, h_n^{(k)}$.

Dalam bentuk matriks, bentuk iteratif persamaan matrik adalah sbb:

Tahap 1:

$$h_1^{(k+1)'} = \frac{1}{A_{11}} [B_1 - A_{12}h_2^{(k)} - \dots - A_{1n}h_n^{(k)}]$$

$$D_A = [h_1^{(k)} - h_1^{(k+1)'}] R_E$$

$$h_1^{(k+1)} = h_1^{(k)} - D_A$$

Tahap 2:

$$h_2^{(k+1)'} = \frac{1}{A_{22}} [B_2 - A_{21}h_1^{(k+1)} - \dots - A_{2n}h_n^{(k)}]$$

$$D_A = [h_2^{(k)} - h_2^{(k+1)'}] R_E$$

$$h_2^{(k+1)} = h_2^{(k)} - D_A$$

Tahap 3:

$$h_3^{(k+1)'} = \frac{1}{A_{33}} [B_3 - A_{31}h_1^{(k+1)} - \dots - A_{3n}h_n^{(k)}]$$

dan seterusnya, hingga dapat dirumuskan

$$h_n^{(k+1)'} = \frac{1}{A_{nn}} [B_n - A_{n1}h_1^{(k+1)} - A_{n2}h_2^{(k+1)} - \dots - A_{nm-1}h_{m-1}^{(k+1)}]$$

Dari skema iteratif di atas, terlihat bahwa hasil perhitungan tahap 1 langsung digunakan pada perhitungan nilai-nilai selanjutnya. Jadi pada tahap 2, nilai yang digunakan untuk h_1 , bukan lagi h_1 awal yang kita notasikan dengan $h_1^{(k)}$, tetapi h_1 hasil perhitungan tahap 1 yaitu $h_1^{(k+1)}$. Pada tahap 3, nilai h_1 yang digunakan adalah $h_1^{(k+1)}$ dan nilai h_2 yang digunakan adalah $h_2^{(k+1)}$, dan begitu seterusnya.

R_E yaitu faktor relaksasi (*relaxation factor*) adalah suatu faktor yang

digunakan untuk mempercepat konvergensi solusi.

$$u = \frac{Sr^2}{4Kbt} = \frac{Sr^2}{4Tt}$$

di mana

Q : debit pengambilan

h_0 : head piezometrik sesaat sebelum pemompaan, $t=0$

h : head piezometrik setelah waktu pemompaan t

r : jarak sumur terhadap titik yang ditinjau

S : storativitas (koefisien storage)

K : konduktivitas hidraulik

b : tebal aquifer

t : waktu pemompaan

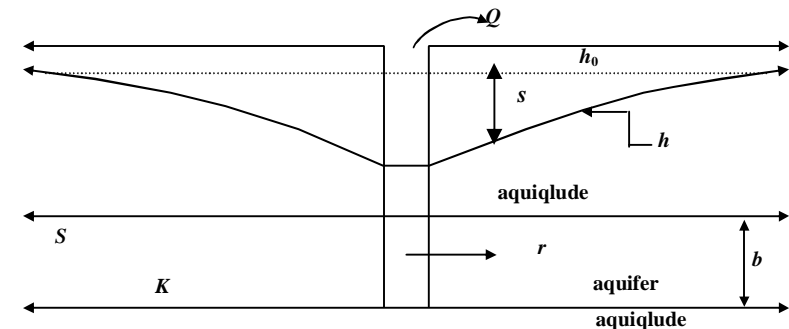
Untuk lebih jelasnya, kondisi di atas dapat dilihat pada Gambar 1

Solusi Analitik aliran tak tunak pada aquifer tertekan

Menurut Theis (Dawson & Istok, 1991), formula penurunan tinggi tekan (*drawdown*) akibat suatu pemompaan pada suatu aquifer tertekan adalah sebagai berikut:

$$s = h_0 - h = \frac{Q}{4\pi Kb} W(u) = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

$W(u)$ merupakan fungsi sumur, dengan



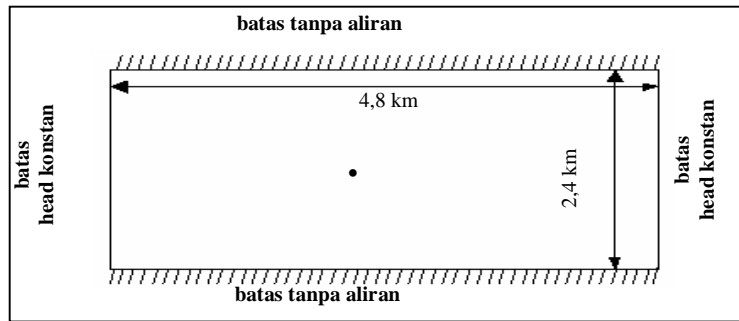
Gambar 1. Drawdown pada aquifer tertekan (Dawson & Istok, 1991)

Metode Penelitian

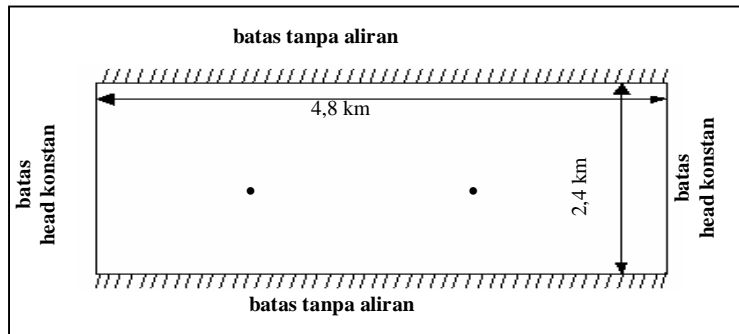
Pada penelitian ini dilakukan simulasi dengan menggunakan beberapa faktor relaksasi pada model aliran airtanah kondisi tak tunak, dua

dimensi, pada aquifer tertekan, pada dua jenis kasus yaitu:

- 1) Kasus pemompaan dengan sumur tunggal (Gambar 2)
- 2) Kasus pemompaan dengan sumur ganda (Gambar 3)



Gambar 2. Wilayah model kasus sumur tunggal

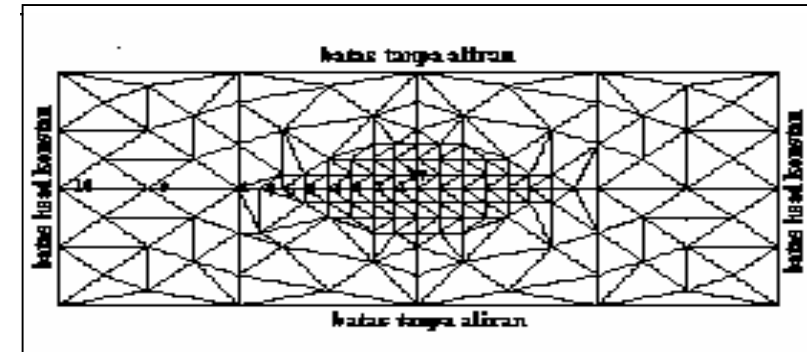


Gambar 3. Wilayah model kasus sumur ganda

Sebagai langkah awal penelitian, wilayah model didiskritisasi atas sejumlah elemen segitiga (karena penyelesaiannya menggunakan metode numerik elemen hingga).

Pada kasus sumur tunggal, aquifer diasumsikan homogen isotrop dengan luas wilayah model $(4,8 \times 2,4) \text{ km}^2$, memiliki satu sumur ditengah

kawasan model, yaitu pada node 17. Wilayah model didiskritisasi dengan jumlah elemen (m) sebanyak 256 dan jumlah node (n) sebanyak 137 (Gambar 4) dan akan dieksploitasi dengan debit (Q) sebesar $0,06 \text{ m}^3/\text{detik}$ untuk waktu simulasi (t_m) selama 6 jam.



Gambar 3. Diskritisasi wilayah model kas sumur tunggal

Data selengkapnya yang digunakan dalam kasus sumur tunggal adalah:

- $h_0 = 50 \text{ m}$
- $T = 0,015 \text{ m}^2/\text{det}$
- $S = 0,001$
- $\Delta t = 0,6 \text{ jam}$
- $t_m = 6 \text{ jam}$
- $R_E = 1$
- $E_R = 0,01 \text{ m}$
- $Q = -0,06 \text{ m}^3/\text{det}$

Hasil dari simulasi di atas (disebut hasil numerik), kemudian dibandingkan dengan hasil perhitungan analitis, yang sebagai contoh perhitungan diambil titik 8 (Gambar 4), dimana jarak (r) = 1200 m.

Menurut Theis (Dawson & Istok, 1991), Drawdown (s):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

dengan

$$u = \frac{Sr^2}{4Tt}$$

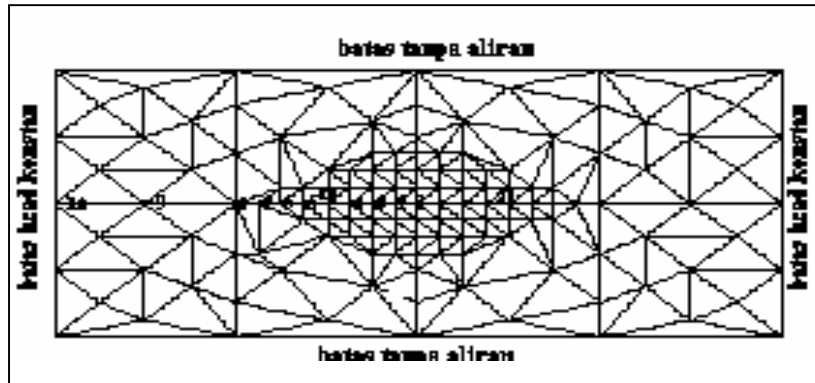
$$= \frac{0,001 \times 1200^2}{4 \times 0,015 \times 6 \times 3600} = 1,111$$

$$W(u) = 1,826635 \times 10^{-1}$$

$$S = 0,058$$

$$h = h_0 - s = 50 - 0,058 = 49,942 \text{ m}$$

Pada kasus sumur ganda, data yang digunakan sama dengan data yang digunakan pada kasus sumur tunggal, kecuali bahwa sumur terletak pada node 20 dan 21 seperti terlihat pada Gambar 5. Debit masing-masing sumur adalah $0,03 \text{ m}^3/\text{det}$ dan mulai dipompa pada saat yang bersamaan.



Gambar 4. Diskritisasi wilayah model kasus sumur ganda

Data selengkapnya yang digunakan dalam kasus sumur ganda adalah:

- r_A (terhadap sumur A) = 600 m
- r_B (terhadap sumur B) = 1800 m
- h_0 = 50 m
- T = 0,015 m²/det
- S = 0,001
- t_m = 6 jam
- R_E = 1
- E_R = 0,01 m
- Q_A = -0,03 m³/det
- Q_B = -0,03 m³/det

di mana:

$$u_A = \frac{Sr_A^2}{4Tt_m}$$

$$u_B = \frac{Sr_B^2}{4Tt_m}$$

maka

$$u_A = \frac{0,001 \times 600^2}{4 \times 0,015 \times 6 \times 3600} = 0,278$$

$$u_B = \frac{0,001 \times 1800^2}{4 \times 0,015 \times 6 \times 3600} = 2,5$$

Karena mulai dipompa pada saat yang bersamaan, maka drawdown (s):

$$s = \frac{1}{4\pi T} [Q_A W(u_A) + Q_B W(u_B)]$$

$$W(u_A) = 0,96333680$$

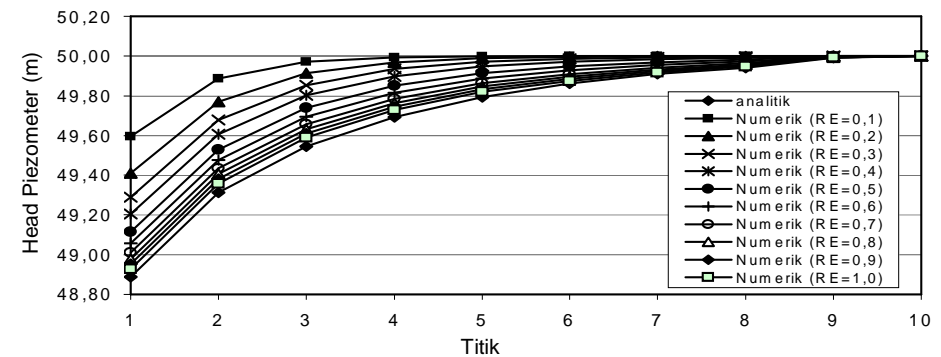
$$W(u_B) = 0,02486907$$

$$s = \frac{1}{4\pi \times 0,015} (0,03 \times 0,9633368 + 0,03 \times 0,02486907) = 0,157$$

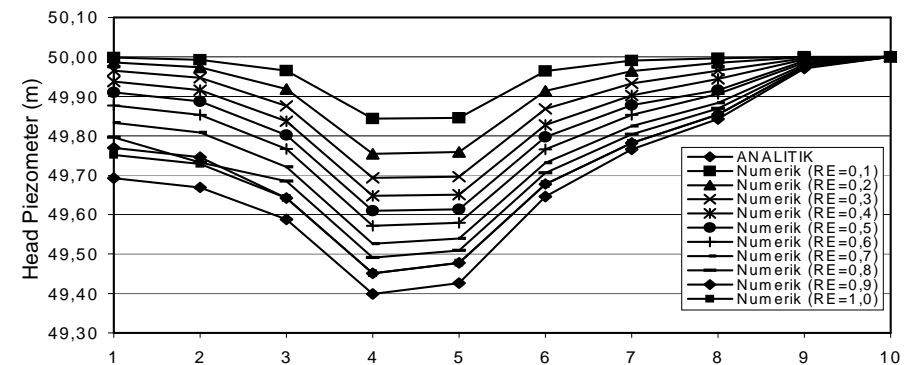
Analisis Data

Data yang dapat dikumpulkan dari hasil simulasi ini dan perbedaannya (angka koreksi) terhadap hasil analitik disajikan pada Gambar 6 s.d. 9 dan Tabel 1.

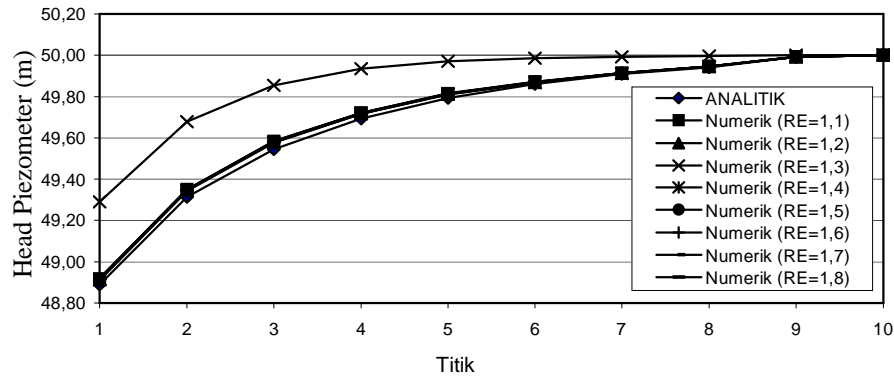
$$h = h_0 - s = 50 - 0,157 = 49,843 \text{ m}$$



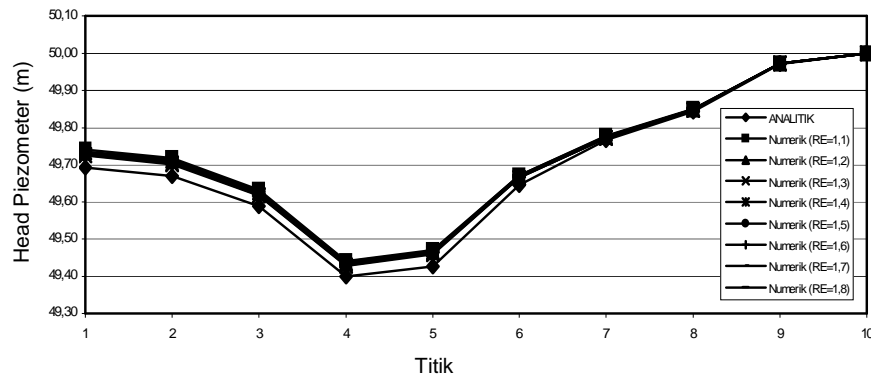
Gambar 6. Hasil analitik dan numerik kasus sumur tunggal ($R_E = 0,1$ s.d. $1,0$)



Gambar 7. Hasil analitik dan numerik kasus sumur ganda ($R_E = 0,1$ s.d. $1,0$)



Gambar 8. Hasil analitik dan numerik kasus sumur tunggal ($R_E = 1,1$ s.d. $2,0$)



Gambar 9. Hasil analitik dan numerik kasus sumur ganda ($R_E = 1,1$ s.d. $2,0$)

Tabel 1. Rerata perbedaan hasil analitik dan numerik

R_E	Sumur Tunggal (%)	Sumur Ganda (%)
0,1	0,509	0,523
0,2	0,427	0,454
0,3	0,358	0,392
0,4	0,297	0,334
0,5	0,223	0,287
0,6	0,171	0,233
0,7	0,125	0,172
0,8	0,095	0,124
0,9	0,095	0,091
1,0	0,044	0,068
1,1	0,035	0,056
1,2	0,033	0,048
1,3	0,030	0,039
1,4	0,030	0,039
1,5	0,029	0,039
1,6	0,033	0,040
1,7	0,035	0,047
1,8	0,036	0,040
1,9	Tidak konvergen	Tidak konvergen
2,0	Tidak konvergen	Tidak konvergen

PENUTUP

Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang dilakukan, dapat diambil kesimpulan bahwa faktor relaksasi (R_E) yang digunakan untuk mempercepat pencapaian konvergensi solusi, sebaiknya diambil 1 – 1,5 karena dengan penggunaan faktor relaksasi yang makin jauh lebih besar dari 1,5 dan lebih kecil dari 1, solusi yang didapat cenderung makin tidak akurat. Sedangkan penggunaan faktor relaksasi yang lebih besar dari

1,8 akan menyebabkan skema iterasi menjadi tidak konvergen sehingga ketepatan (*accuracy*) yang kita syartkan pada awal simulasi, tidak akan pernah tercapai.

Saran

Diduga ada pengaruh diskritisasi ruang terhadap nilai faktor relaksasi (R_E) yang menyebabkan skema iterasi menjadi tidak konvergen lagi. Untuk itu perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh diskritisasi

ruang (baik jarak maupun keteraturannya) terhadap keakuratan solusi numerik dengan penggunaan nilai R_E .

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, M. P. & Wang, H. F. (1982), *Introduction to Groundwater Modeling, Finite Difference and Finite Element Method*, San Fransisco: W. H. Freeman and Company.
- Anderson, M. P. & Woessner, W. W., (1992), *Applied Groundwater Modeling*, San Diego: Academic Press.
- Desai, C. S. (1988), *Dasar-dasar Metode Elemen Hingga*, Jakarta: Erlangga.

- Freeze, R. A. & Cherry J. A. (1979), *Groundwater*, New Jersey: Prentice-Hall.
- Istok, J. (1989), *Groundwater Modeling by the Finite Element Method*, New York: American Geophysical Union.
- Kinzelbach, W. (1986), *Groundwater Modeling*, New York: Elsevier Science.
- Kazda, I. (1990), *Finite Difference Technique in Groundwater Flow Studies*, New York: Elsevier Science.
- Nirmala, A. (1998), *Pemodelan Aliran Air Tanah Akuifer Tertekan dengan Metode Elemen Hingga Formulasi Galerkin*, Tugas Akhir, Bandung: ITB.

ANALISA DAYA DUKUNG PONDASI TIANG TONGKAT PADA TANAH LUNAK DENGAN PENDEKATAN RUMUS TERZAGHI DAN HUKUM ARCHIMIDES (STUDY KASUS KOTA PONTIANAK)

Hari Wibowo

Staf Pengajar Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura Pontianak

ABSTRAK

Bangunan-bangunan di Kota Pontianak dan sekitarnya secara umum masih menemui permasalahan berupa kondisi tanah yang kurang baik. Kondisi tanah yang ada di Kota Pontianak pada umumnya berupa tanah lempung yang bersifat lunak, dan pada lapisan permukaannya mengandung bahan-bahan organik sebagai akibat dari pelapukan kayu (vegetasi asal) kondisi ini memberikan kapasitas daya dukung rendah terhadap suatu sistem konstruksi yang akan dibangun di atasnya.

Bangunan kayu adalah suatu konstruksi bangunan ringan yang sangat ideal untuk kondisi tanah yang sangat lunak. Meskipun demikian banyak bangunan kayu yang keadaannya mengalami penurunan tidak merata, sehingga kadang-kadang terlihat miring ataupun turun pada sisi sudutnya.

Untuk menganalisa pondasi tiang tongkat, sebagai pondasi tradisional yang sejak lama dipergunakan oleh masyarakat di Kalimantan Barat, oleh karena itu penelitian ini mempergunakan pendekatan rumus umum dangkal Terzaghi dengan kombinasi hukum hidraulika Archimedes.

Sehingga dari hasil analisa tersebut dapat memberikan informasi secara umum dari pada pondasi tiang tongkat tersebut yang bersifat konvensional, mudah dan cepat dalam pelaksanaannya juga relatif lebih hemat dalam pembiayaannya, sehingga dapat dikembangkan dan dimodifikasi sebagai pondasi alternatif.

Rumus umum pondasi dangkal Terzaghi kombinasi hukum hidraulika Archimedes, menghasilkan bahwa pondasi tiang tongkat aman di gunakan pada kondisi tanah lempung atau lunak di kota Pontianak, karena daya dukung izin lebih besar dari gaya berat pondasi tiang tongkat, ($P = 0,0439 \text{ ton} < P_{izin} = 0,048589 \text{ ton}$). Dan juga ada keseimbangan antara besar berat gaya keatas F_A dengan besar berat gaya ke bawah F_B , ($F_A = 0,430659 \text{ t.m/det}^2$ sama dengan $F_B = 0,430659 \text{ t.m/det}^2$).

PENDAHULUAN

Kondisi tanah yang ada di Kota Pontianak pada sebagian berupa tanah lempung yang bersifat lunak, pada lapisan permukaannya mengandung bahan-bahan organik sebagai akibat dari pelapukan kayu (vegetasi asal) kondisi ini memberikan suatu kapasitas daya dukung yang rendah terhadap suatu sistem konstruksi yang akan dibangun di atasnya. Selain itu pula daerah Kota Pontianak sebagian mempunyai banyak daerah rawa serta sungai.

Berdasarkan hasil penelitian, pada beberapa lokasi, lapisan tanah lunak ini mencapai kedalaman 40 meter dari permukaan tanah. Keadaan tanah ini akan menyebabkan settlement (penurunan) yang relatif besar apabila diberikan beban yang melewati batas, kondisi ini menyebabkan pembiayaan menjadi mahal.

Dengan semakin pesatnya pembangunan di Kalimantan Barat khususnya di Kota Pontianak menuntut penyediaan lahan pembangunan yang belum memadai, hampir \square 50 % daerah Kalimantan Barat terdiri dari daerah rawa atau tanah lempung/lunak terutama bagian barat seperti Kota Pontianak, sehingga perlu dilakukan pengoptimalan lahan tanah lempung/lunak untuk lahan pembangunan, dengan cara salah satunya menggunakan teknologi tepat guna, misalnya pondasi tiang tongkat kayu yang merupakan warisan dari nenek moyang orang Pontianak.

Pondasi tiang tongkat ini umumnya digunakan baik untuk

rumah tinggal sederhana, semi permanen maupun permanen (kecuali menggunakan dinding batako atau sejenisnya), gedung-gedung, gedung bertingkat (lantai 1 - 3) perkantoran, jembatan serta ruko (rumah toko). Sehingga penggunaan pondasi tiang tongkat ini sudah merupakan alternative pilihan.

Jenis kayu yang digunakan yaitu Bliyan (nama daerah) yang termasuk famili (Lauranceae) yang banyak diproduksi hutan Kalimantan Barat. Kayu ini selain termasuk kayu kelas kuat I, juga termasuk klasifikasi kayu kelas awet I yang memiliki kekuatan tinggi terhadap lenturan, tekanan dan tarikan. Selain itu, kayu belian juga tahan terhadap serangan rayap, derajat keasaman tanah dan sifat susut muai serta retak kayu (PKKI NI-5 1961).

Pengalaman masyarakat Kalimantan Barat khususnya Kota Pontianak, menggunakan tiang tongkat dilengkapi alas dan laci adalah selain untuk menambah kekuatan daya dukung tiang, juga bahannya mudah diperoleh, murah dan mudah dalam pelaksanaannya, karena tidak menggunakan alat-alat yang mahal. Dasar lain, karena kondisi lapisan tanah yang umumnya sangat lunak.

Walaupun pondasi tiang tongkat berlaci ini sudah memenuhi persyaratan teoritis maupun teknis antara lain kekakuan, kekuatan serta ekonomisnya namun demikian, tidak menutup kemungkinan akan terjadi kegagalan bangunan karena belum diketahui daya dukung yang sebenarnya, dimana perencanaan

hanya berdasarkan pengalaman semata.

Kegagalan konstruksi atau bangunan bagian atasnya masih bisa memungkinkan dilakukan perbaikan-perbaikan. Akan tetapi kegagalan perencanaan pondasi akan berakibat fatal dan setidaknya akan memakan biaya yang sangat besar untuk memperbaikinya.

Untuk menghindari kegagalan pondasi karena penurunan yang tidak merata, maka diperlukan perencanaan yang matang serta perhitungan yang tepat. Pada pondasi tiang tongkat belum ada kepastian daya dukung sebenarnya walaupun ada rumus empiris sebagai pendekatannya.

Pondasi Tiang tongkat termasuk pondasi dangkal dan perhitungan berdasarkan rumus umum Terzaghi, dan juga termasuk Floating fondation tetapi permasalahannya apakah pondasi ini termasuk kategori tenggelam, mengapung, atau terendam. Dan apakah pendekatan rumus Terzaghi bisa digunakan pada tanah lempung/lunak.

Permasalahan

Berdasarkan dari hal-hal tersebut diatas maka yang menjadi permasalahan dalam penelitian ini adalah :

1. Bangunan kayu adalah suatu konstruksi bangunan ringan yang sangat ideal untuk kondisi tanah yang sangat lunak. Meskipun demikian banyak bangunan kayu yang keadaannya mengalami penurunan tidak merata, sehingga

kadang-kadang terlihat miring ataupun turun pada sisi sudutnya.

2. apakah karena kapasitas daya dukung pondasi lebih kecil dari beban yang bekerja diatasnya.
3. apakah karena faktor tanahnya tidak menemukan lapisan keras.
4. apakah karena tanah berupa tanah rawa atau gambut (banyak air, jadi daya dukung tanah sangat lemah); dan permasalahan keempat, apakah karena desain konstruksi kayu dan material kayu yang digunakan (faktor awet dan kuat kayu).
5. Apakah tanah yang bersangkutan mampu menahan beban pondasi tanpa terjadi keruntuhan akibat pergeseran seperti :
 - a. Penurunan (settlement)
 - b. Besarnya penurunan yang terjadi
 - c. Kecepatan penurunan yang terjadi.

Maksud dan Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dari tulisan ini adalah untuk mengkaji pondasi tiang tongkat, sebagai pondasi tradisional yang sejak lama dipergunakan oleh masyarakat di Kalimantan Barat berdasarkan pendekatan rumus umum dangkal Terzaghi dengan kombinasi hukum hidraulika Archimedes.

Manfaat dari penulisan ini adalah untuk memberikan informasi secara umum dari pondasi tiang tongkat yang bersifat konvensional, mudah dan cepat dalam pelaksanaannya juga relatif lebih hemat dalam pembiayaannya, sehingga dapat dikembangkan dan

dimodifikasi sebagai pondasi alternatif.

Tinjauan Pustaka

Tanah Lunak

Umumnya lapisan tanah yang disebut lapisan yang lunak adalah lempung (*clay*) atau lanau (*silt*) yang mempunyai harga pengujian penetrasi standar (Standard penetration test) N yang lebih kecil dari 4, atau tanah organis seperti gambut yang mempunyai kadar air alamiah yang sangat tinggi. Demikian pula lapisan tanah berpasir yang dalam keadaan lepas mempunyai harga N yang kurang dari 10, diklasifikasikan sebagai lapisan yang lunak.

Biasanya sebahagian besar dari lapisan tanah lunak itu telah dibentuk oleh proses alamiah. Tebal, luas dan stratifikasinya sangat tergantung dari corak topografi dan geologi yang membentuk lapisan tanah lunak serta kondisi sekeliling sesudah terjadi formasi itu. Kesemuanya ini mengakibatkan keanekaragaman yang pelik.

Dalam pelaksanaan Pembangunan di atas lapisan tanah lunak, maka pertama-tama masalah teknis yang harus diselidiki adalah daya dukung (*bearing capacity*) dan penurunan (*settlement*). Kadang-kadang tergantung dari jenis konstruksi, kita tidak memerlukan penyelidikan daya dukung. Sebaliknya dalam menghadapi kemungkinan perbedaan penurunan (*differential settlement*), berarti bukan menggunakan pondasi langsung, melainkan harus menggunakan

pondasi tiang yang mencapai kedalam tertentu. Jadi, pemilihan dan penggunaan jenis pondasi dapat juga dianggap sebagai tindakan dalam menghadapi lapisan tanah pondasi yang lunak.

Lapisan tanah lunak umumnya terdiri dari tanah yang sebagian besar terdiri dari butiran-butiran yang sangat kecil seperti lempung atau lanau. Dalam lapisan itu, makin mudakumulasinya, makin tinggi letak muka air tanahnya. Lapisan muda seperti itu juga kurang mengalami pembebanan sehingga sifat mekanisnya buruk dan tidak mampu memikul beban.

Sifat lapisan tanah yang lunak adalah merupakan gaya gesernya kecil, kemampuan yang besar dan koefisien permeabilitas yang kecil. Jadi, bila pembebanan konstruksi melampaui daya dukung kritis, maka akan terjadi kerusakan tanah pondasi. Meskipun intensitas beban itu kurang dari daya dukung kritis, dalam jangka waktu yang lama besarnya penurunan akan meningkat yang akhirnya akan mengakibatkan berbagai kesulitan (Ir. Suyono Sasrodarsono & Kazuto Nakazawa, 1980 : 3 & 223).

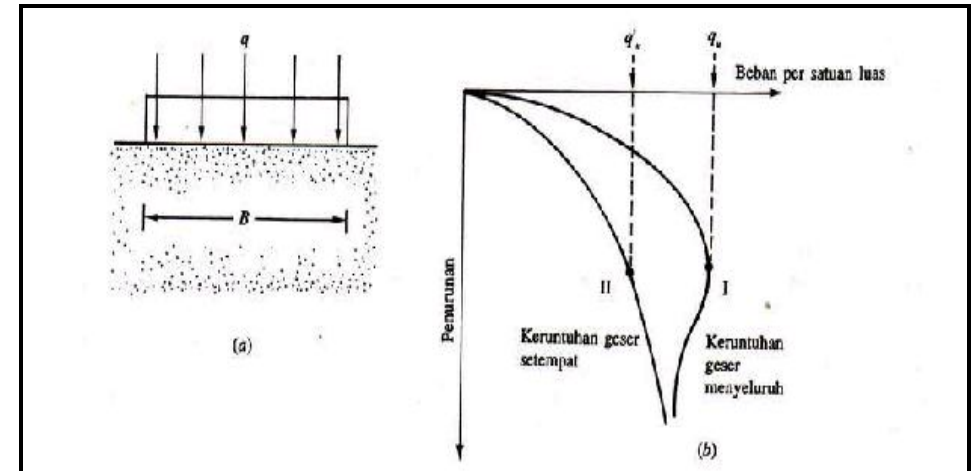
Daya Dukung Tanah Untuk Pondasi Dangkal

Daya dukung tanah adalah tekanan maksimum yang dapat dipikul oleh tanah tersebut tanpa terjadi kelongsoran.

Dalam perencanaan pondasi gedung atau bangunan lain ada dua hal utama yang harus diperhatikan yaitu :

- Daya dukung tanah; yaitu apakah tanah yang bersangkutan cukup kuat untuk menahan beban pondasi tanpa terjadinya keruntuhan akibat menggeser (*shear failure*). Hal ini juga tergantung pada kekuatan geser tanah.
- Penurunan yang akan terjadi, hal ini tergantung pada macam tanah,

Bila beban di atas pondasi ditambah sedikit demi sedikit, maka pondasi akan turun yang akhirnya terjadi kelongsoran. Besarnya beban ini disebut beban longsor dan tekanan yang bekerja di sebut daya dukung atau keseimbangan (*ultimate bearing capacity*) dari tanah. (Dr.Ir. L.D.Wesley, 1988). Seperti contoh gambar dibawah ini.



Gambar 1: Daya dukung batas tanah untuk pondasi dangkal
(a). Model Pondasi (b). Grafik hubungan antara beban dengan penurunan

Daya Dukung Terzaghi

Didalam teknik pondasi terdapat bermacam-macam cara untuk menghitung besarnya kapasitas daya dukung tanah pondasi dangkal, yang dapat disebut pionir dan paling terkenal dikemukakan oleh Terzaghi (1943).

Teori daya dukung Terzaghi dimaksudkan untuk pondasi langsung yang tidak begitu dalam. Teori ini berdasarkan pada anggapan bahwa

kekuatan geser tanah dapat dinyatakan dengan pertimbangan :

$$s = c + \sigma \tan \phi$$

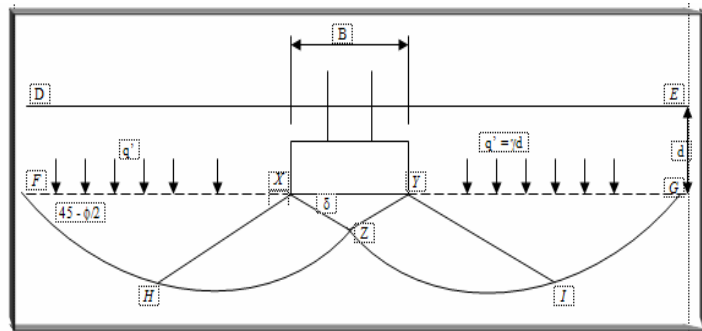
dimana :

s = Kekuatan geser tanah.
 σ = Tegangan normal pada bidang geser.

C dan ϕ = adalah konstanta kekuatan geser tanah tersebut biasanya disebut kohesi (c) dan sudut perlawanan geser (ϕ).

Disamping anggapan-anggapan di atas, anggapan lain dasar teori yang dipakai pada analisa *Terzaghi* adalah sebagai berikut :

- a. Menghilangkan tahanan geser tanah diatas bidang horizontal yang melewati dasar pondasi.
- b. Menggantikan butiran dengan seolah-olah ada beban sebesar. $q = \gamma \cdot D_f$
- c. Membagi distribusi tegangan dibawah pondasi menjadi tiga bagian
- d. Tanah adalah homogen dan isotropic, kekuatan geser direpresentasikan oleh persamaan Coulomb : $\tau = c + \sigma \tan \phi$
- e. Dasar pondasi menerus, kasar dan penyelesaian permasalahan dua dimensi
- f. Zona elastis dibatasi oleh bidang lurus bersudut $\beta = \phi$ dengan horizontal, sedang zona plastis termobilisasi.



Sumber : Ir. Rudy Gunawan., 1990, *Pengantar Teknik Fondasi*, Hal. 17., Kanisius Yogyakarta.

Gambar 2 Keruntuhan Pondasi

Dari penjabaran keseimbangan statika, *Terzaghi* mengemukakan rumus praktis untuk menghitung daya

- g. Total tekanan pasip P_p terdiri dari tiga komponen pembentuk dimana masing-masing dapat dihitung sendiri-sendiri, kemudian ketiga komponen tersebut ditambahkan meskipun permukaan kritis masing-masing tidak sama.

Sedangkan analisa *Terzaghi* adalah, analisa kapasitas daya dukung *Terzaghi* merupakan perkembangan dari analisa kapasitas daya dukung *Prandtl* (1920). Jadi perhitungan daya dukung pondasi tiang tongkat bisa didekati sebagai pondasi dangkal atau persegi dan telapak dengan rumus pondasi dangkal, dengan syarat ($D_f \leq B$).

Bila dianggap pondasi panjang tak terhingga, maka garis keruntuhan (failure-plane) dapat digambarkan sebagai berikut :

dukung tanah terhadap pondasi tiang tongkat, adalah pada kenyataannya berada pada kedalam yang relatif

dangkal ($D_f = 0,5 \text{ m}$). Maka dengan rumus *Terzaghi* 1943 (Bowles, 1977) sebagai berikut :

- 1. Untuk pondasi menerus. $q_u = c \cdot N_c + q \cdot N_q + 0,5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$
 - 2. Untuk Pondasi Persegi $q_u = 1,3 \cdot c \cdot N_c + q \cdot N_q + 0,4 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$
 - 3. Untuk Pondasi Lingkaran $q_u = 1,3 \cdot c \cdot N_c + q \cdot N_q + 0,3 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$
- Dimana

- q_u = Daya dukung tanah ultimit
- c = Kohesi tanah
- γ = Berat volume tanah
- B = Ukuran terkecil telapak pondasi
- q = $\gamma \cdot D_f$ (surcharge load)
- D_f = Kedalaman dasar pondasi dari permukaan galian
- N_q, N_c, N_γ = Faktor kapasitas daya dukung pondasi

Tabel 1 Nilai-nilai Faktor Daya Dukung Tanah *Terzaghi*

ϕ	Keruntuhan Geser Umum			Keruntuhan Geser Lokal		
	N_c	N_q	N_γ	N_c'	N_q'	N_γ
0°	5,7	1,0	0,0	5,7	1,0	0,0
5°	7,3	1,6	0,5	6,7	1,4	0,2
10°	9,6	2,7	1,2	8,0	1,9	0,5
15°	12,9	4,4	2,5	9,7	2,7	0,9
20°	17,7	7,4	5,0	11,8	3,9	1,7
25°	25,1	12,7	9,7	14,8	5,6	3,2
30°	37,2	22,5	19,7	19,0	8,3	5,7
34°	52,6	36,5	35,0	23,7	11,7	9,0
35°	57,8	41,4	42,4	25,2	12,6	10,1
40°	95,7	81,3	100,4	34,9	20,5	18,8
45°	172,3	173,3	297,5	51,2	35,1	37,7
48°	258,3	287,9	780,1	66,8	50,5	60,4
50°	347,6	415,1	1153,2	81,3	65,6	87,1

Sumber : Bowles, J. E., 1977, *Foundation Analysis and Design*, McGraw-Hill Kogakusha. Ltd, Hal. 202, Tokyo

Hidraulika

Hidraulika berasal dari kata *hydro* dalam bahasa Yunani yang berarti air. Dengan demikian ilmu hidraulika dapat didefinisikan sebagai cabang dari ilmu teknik yang mempelajari perilaku air (fluida) baik dalam keadaan diam maupun bergerak, (Thomas Krist, Dines Ginting, 1989).

Fluida adalah zat yang bisa mengalir, yang mempunyai partikel yang mudah bergerak dan berubah bentuk tanpa pemisahan massa. Tahanan fluida terhadap perubahan bentuk sangat kecil, sehingga fluida dapat mudah mengikuti bentuk ruangan atau tempat yang membatasinya. Fluida dapat dibedakan menjadi dua macam yaitu

zat cair dan gas, (Ranald V. Giles / Ir. Herman W Soemitro 1993). Zat cair dan gas mempunyai sifat-sifat serupa, yang terpenting adalah sebagai berikut:

- Kedua zat ini tidak melawan perubahan bentuk.
- Kedua zat ini tidak mengadakan reaksi terhadap gaya geser, yaitu gaya yang bekerja sejajar dengan permukaan dengan lapisan-lapisan zat cair atau gas yang mencoba untuk menggeser lapisan-lapisan tersebut antara satu terhadap dengan yang lainnya. Oleh karena itu apabila ada sentuhan sedikit saja, dua lapisan yang saling berdampingan akan bergerak satu terhadap yang lainnya.

Sedang perbedaan utama antara zat cair dan gas adalah sebagai berikut :

- Zat cair mempunyai permukaan bebas, dan massa zat cair hanya akan mengisi volume yang diperlukan dalam suatu ruangan, sedangkan gas tidak mempunyai permukaan bebas dan massanya akan mengisi seluruh ruangan.
- Zat cair merupakan yang praktis tak termampatkan, sedangkan gas adalah zat yang yang bisa dimampatkan.

Prilaku zat cair, terutama air banyak dipelajari dalam bidang teknik sipil, sedangkan gas banyak dipelajari dalam bidang teknik mesin, kimia, aeronotika, dan sebagainya. Zat cair mempunyai beberapa sifat berikut ini :

- Apabila ruangan lebih besar dari volume zat cair, akan terbentuk permukaan bebas horizontal yang berhubungan dengan atmosfer.

- Mempunyai rapat massa dan berat jenis.
- Dapat dianggap tidak termampatkan (*incompressible*).
- Mempunyai viskositas (kekentalan).
- mempunyai kohesi, adhesi, dan tegangan permukaan.

Diantara sifat-sifat tersebut, yang terpenting adalah rapat massa, berat jenis dan viskositas.

Rapat Massa (ρ)

Rapat massa, ρ (*rho*), didefinisikan sebagai zat tiap satuan volume pada temperatur dan tekanan tertentu.

$$\rho = \frac{M}{V}$$

dengan M adalah massa yang menempati volume (V). Dalam system satuan SI apabila massa diberikan dalam kilogram (kg), maka rapat massa adalah dalam kilogram per meter kubik (kg/m^3). Rapat massa air pada suhu 4°C dan tekanan atmosfer standart adalah 1000 kg/m^3 .

Berat Jenis (γ)

Berat jenis diberi notasi γ (gamma), adalah berat tiap satuan volume pada temperatur dan tekanan tertentu. Berat suatu benda adalah hasil kali antara massa dan percepatan gravitasi . Terdapat hubungan antara berat jenis dan rapat massa dalam bentuk berikut :

$$\gamma = \rho \cdot g$$

Dimana :

- γ : Berat jenis (N/m^3 untuk satuan SI atau kgf/m^3 untuk satuan MKS)

γ : Rapat massa (kg/m^3 untuk satuan SI atau kgm/m^3 untuk satuan MKS)

g : Percepatan gravitasi (m/s^2)
Berat jenis air pada suhu 4°C dan tekanan atmosfer adalah $9,81 \text{ kN/m}^3$ atau 1000 kg/m^3 atau 1 ton/m^3 .

Pengapungan dan Pengambangan

a. Prinsip Archimedes

Prinsip Archimedes telah digunakan oleh manusia selama kurang 2200 tahun. Volume suatu benda padat tak teratur dapat ditemukan dengan menentukan kehilangan berat nyatanya, bila benda tersebut ditenggelamkan seluruhnya dalam suatu cairan yang kerapatan relatifnya diketahui. Kerapatan relatif berbagai cairan dapat ditentukan dengan menggunakan kedalaman pengambangan hydrometer, (Ranald V. Giles / Ir. Herman W Soemitro, 1986).

Bahwa pengapungan adalah fungsi dari tekanan yang dapat didemonstrasikan dengan pembuktian dari prinsip yang telah dikenal yang menyatakan bahwa :

Sebuah benda yang keseluruhan atau sebagian ditenggelamkan dalam fluida maka kehilangan berat yang nyata sama dengan berat dari cairan yang dipindahkan, (R.H. Dugdale/Ir. Bambang Priambodo, 1981).

b. Kestabilan dari Benda-benda yang Tenggelam dan Mengambang

Agar terjadi kestabilan suatu benda yang tenggelam, pusat berat benda tersebut haruslah terletak tepat di bawah pusat pengapungan (berat)

cairan yang didesak. Andai kata dua titik tersebut berhimpit, benda yang tenggelam atau akan berada pada keseimbangan netral dalam segala posisi.

Kestabilan benda-benda lain yang mengambang akan tergantung pada yang telah terjadi adalah momen yang tepat atau momen putar pada waktu pusat berat dan pusat pengapungannya bergerak keluar dari kesatuan tegaknya akibat pergeseran pusat pengapungan tersebut.

Jadi Hukum *Archimedes* mengatakan bahwa : "Benda yang tercelup didalam fluida akan mengalami gaya keatas (*gaya Archimedes*) seberat fluida yang dipindahkan". Dengan rumus umum sebagai berikut :

$$F_A = \rho \times g \times V$$

Dimana :

F_A	= Gaya <i>Archimedes</i> (kg / m^2)
P	Massa Jenis Fluida (kg / m^3)
g	Percepatan Gravitasi Bumi (m / s^2)
V	volume (m^3)

Kontruksi Kayu

Ciri-ciri dan Sifat-sifat Kayu

Kayu sebagai bahan bangunan, harus dikenal ciri-ciri dan sifat-sifatnya. Dari 3000 – 4000 jenis pohon yang ada di Indonesia baru kurang lebih 150 jenis yang telah diselidiki dan dianggap penting dalam perdagangan, dan dari jumlah tersebut di atas sebahagian adalah penting untuk bahan konstruksi. Mereka yang

akan mempergunakan jenis kayu sebagai bahan bangunan-bangunan harus sedikitnya mengetahui tentang beberapa ciri-ciri dan sifat-sifat kayu. Antara lain yang penting sekali ialah mengenai sifat-sifat mekanis, faktor-faktor yang mengakibatkan mengurangnya kekuatan dan sifat-sifat yang menjadikan cara penggunaan kayu, karena ini berbeda sekali dari bahan-bahan lain untuk bangunan.

Kepadatan Kayu

Kepadatan kayu berhubungan erat dengan berat jenis kayu dan kekuatan kayu. Semakin ringan kayu, semakin kurang kekuatannya dan begitupun sebaliknya, seperti penjelasan dibawah ini :

a. Berat Jenis Kayu

Yang dimaksud dengan berat jenis (BD) kayu adalah dari kayu kering udar, kadar legas kayu kering udar tergantung pada keadaan iklim setempat. Di Indonesia kadar air ini berkisar antara 12 – 20% dari kayu kering mutlak, (kering mutlak ini hanya dapat dicapai dalam tempat pemanasan atau droogoven). Untuk Bogor kadar air kayu kering udara adalah 15% (angka-angka berat jenis kayu dalam pengumuman-pengumuman LPPK didasarkan didalam kadar legas 15%). Ditempat kering pada musim kemarau kadar legas ini dapat menurun menjadi 13%, sebaliknya di tempat yang lembab, pada musim hujan dapat meningkat menjadi 20%. Kayu yang baru ditebang mempunyai kadar air 40% untuk kayu berat hingga 200% untuk kayu ringan.

b. Kekuatan Kayu

Pada umumnya dapat dikatakan, bahwa kayu-kayu yang berat sekali juga kuat sekali, dan bahwa kekuatan, kekerasan dan sifat teknik lain adalah berbanding lurus dengan berat jenisnya. Tentu perbandingan ini selalu cocok, sebab susunan dari kayu tidak selalu sama.

Kadar Legas Kayu.

Ada tiga rupa kadar legas kayu, ialah kadar legas kayu basah, kadar legas kayu kering udara dan kadar legas (0%) kering mutlak. Kayu yang baru ditebang basah sekali dan tergantung pada jenis kayu, kadar legas letaknya antara 40 – 200%. Pada kayu yang berat sekali 40%, dan 200% pada kayu yang ringan sekali. Kayu yang basah semakin lama semakin kering hingga mencaopai kadar air antara 24% - 30% yang dinamakan "*fiber saturation*".

Pengertian sesudah titik ini akan memperlihatkan perbaikan terhadap sifat-sifat kayu (kecuali "*schock resistence*"). Bagaimana pentingnya harus memperhatikan kadar legas ini dapat dilihat dalam tabel dibawah ini, bahwa kayu yang basah (lebih tinggi dari fiber saturation pont) kekuatannya jauh lebih kurang dari pad kayu yang kering udara (Gardner dan Newlin/Wilson). Oleh sebab itu untuk konstruksi pergunaanlah kayu-kayu yang kering udara.

Kayu Belian/Ulin (*Eusideroxylon Zwageri T.et.B*)

Merupakan tumbuhan yang hidup di dataran rendah pada daerah berpasir. Kayu ulin/belian ditemukan tumbuh di Kalimantan, Palembang,

Jambi, dan Biliton. Julukan atau nama kayu ini selain kayu belian/ulin sering disebut *kayu besi*.

Menurut *Van het Technisch Laboratorium der V.I.B.E.M*, kayu ulin merupakan satu jenis kayu yang paling berat, paling keras, dan paling awet yang dihasilkan oleh alam, meskipun dalam keadaan kering kayu ini tetap tenggelam dalam air.

Berdasarkan Peraturan Konstruksi Kayu Indonesia NI-5 PKKI 1961, bahwa berat jenis kayu bliyan/ulin (BJ) = 1.04 gr/cm^3 , kelas awet I, kelas kuat I dan mutu A

METODOLOGI PENELITIAN

Studi Literatur

Studi literatur ini dilakukan dengan tujuan untuk mengkaji dan mendapatkan rumus-rumus empiris atau mengkaji hubungan antara variabel-variabel yang akan diteliti dengan cara mengumpulkan data sekunder serta mempelajari teori yang berlaku, sehingga dari hasil studi akan dapat diturunkan hipotesa yang merupakan jawaban sementara terhadap masalah yang akan dihadapi dan sebagai pedoman dalam menganalisa, membandingkan atau mengambil suatu kesimpulan dari data-data yang diperoleh dilapangan.

Studi Lapangan

Penelitian di lapangan yang digunakan adalah melihat secara langsung kondisi di lapangan dan juga di dalam pelaksanaan pekerjaannya yang nantinya akan didapatkan data-data objektif yang akan diperlukan. Selanjutnya setelah data-data tersebut ada, maka akan dipakai untuk menguji hipotesa yang

diturunkan secara teoritis dan berdasarkan dari studi pustaka.

Survey lapangan dilakukan pada lokasi di empat (4) Kecamatan yaitu Kecamatan Pontianak Barat, Kecamatan Pontianak Selatan, Kecamatan Pontianak Utara dan Kecamatan Pontianak Timur, masing-masing satu lokasi.

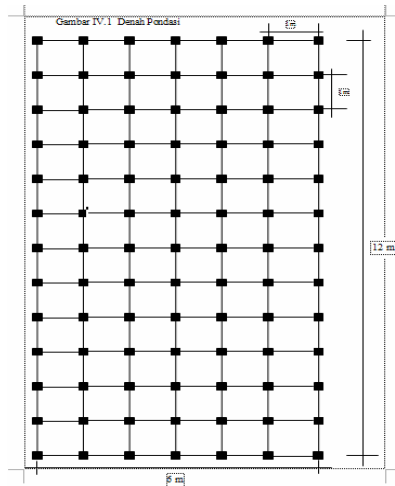
ANALISA DATA

Gambaran dan Data Pondasi

Analisa dilakukan hanya pada upper structure (struktur bawah) pondasi tiang tongkat. Dalam analisa ini digunakan luas bangunan rumah $6 \times 12 \text{ m}^2$. Dalam analisa tongkat kayu bliyan dianggap sama semua dengan dimensi $10 \times 10 \text{ cm}$, panjang tongkat bliyan 2 meter, jumlah titik dari tngkat bliyan (n) adalah sebanyak 91 buah, jarak tiap titik 1 meter, dan 2 buah kayu lempung dengan dimensi $5 \times 25 \text{ cm}$. Denah gambar bangunan rumah $6 \times 12 \text{ m}^2$ tampak atas dapat dilihat sebagai berikut :

Keterangan :

■ → titik dari pondasi tongkat belian



Gambar 4 Denah Rencana Pondasi

Analogi Penetrasi Vertikal (Berat Total Pondasi Tiang Tongkat)

Penetrasi Vertikal (berat total sendiri kayu) yang terjadi pada pondasi tiang tongkat sebagai berikut :

- a. Penampang pondasi berbentuk persegi empat, Artinya memiliki panjang (L) dan lebar (B) dari dimensi pondasi tersebut, maka rumus yang digunakan cukup rumus umum Terzaghi yaitu : $(q_u = 1,3.c.N_c + q.N_q + 0,4.y.B.N_y)$.
- b. Adanya beban di atasnya, dianggap beban luar (tidak ada)

yang ada hanya berat pondasi, laci dan alas.

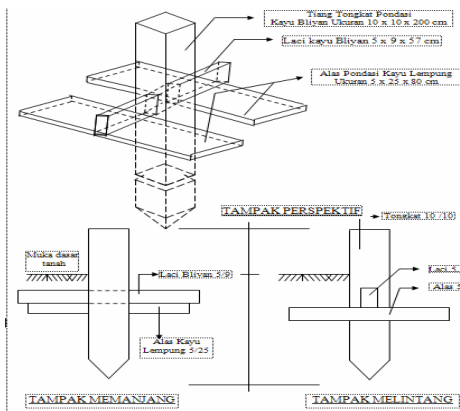
- c. Maka adanya perlawanan oleh gaya Archimedes (F_A) ke atas melawan gaya berat pondasi. Dan juga perlawanan daya dukung tanah itu sendiri (q_u).

d. $q_u^* = \frac{P_u}{A}$

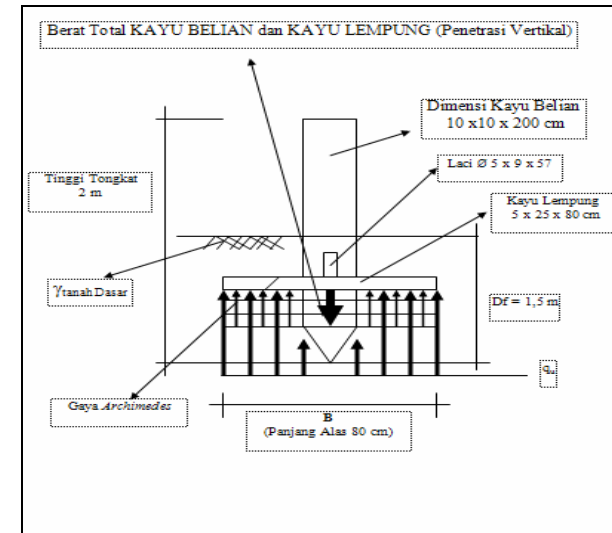
e. Didapat rumusan q_u total =

$q_u + q_u^*$ maka $q = \frac{q_{u, total}}{SF}$

Untuk nilai SF (safety Factor) 1,5 – 3 untuk tanah lempung atau keruntuhan geser (Braja M. Das, Noor Endah, Indrasurya B. Mochtar, 1995, Hal. 126)



Gambar 5 Tripikal Pondasi Tiang Tongkat



Gambar 6 Penetrasi Vertikal pondasi tiang tongkat

Perhitungan Pondasi Tiang Tongkat Menggunakan Struktur Kayu.

Kayu Belian/Ulin

- Berat Jenis Kayu Belian $B_j = 1,19 \text{ gr/cm}^3 = 1190 \text{ kg/m}$
- Kelas awet I dan kelas kuat I
- Dimensi Tiang Tongkat = $10 \times 10 \text{ cm} \times 200 \text{ cm} = 0,1 \times 0,1 \text{ m} \times 2 \text{ m}$
- Dimensi laci = $5 \times 9 \text{ cm} \times 57 \text{ cm} = 0,05 \times 0,09 \text{ m} \times 0,57 \text{ m}$
- Jadi berat sendiri tongkat $W_t = B_j \times \text{Luas penampang tongkat} = 1190 \text{ kg/m}^2 \times 0,1 \text{ m} \times 0,1 \text{ m} \times 2 \text{ m} = 23,8 \text{ kg}$

Jadi berat sendiri laci

- $W_l = B_j \times \text{Luas penampang Laci} = 1190 \text{ kg/m}^2 \times 0,05 \text{ m} \times 0,09 \text{ m} \times 0,57 \text{ m} = 3,1 \text{ kg}$

Kayu Lempung

- Berat Jenis Kayu Lempung $B_j = 0,85 \text{ gr/cm}^3 = 850 \text{ kg/m}$
- Kelas awet II dan kelas kuat II
- Kayu Mutu B
- Dimensi Alas = $5 \times 25 \text{ cm} \times 80 \text{ cm} = 0,05 \times 0,25 \text{ m} \times 0,80 \text{ m} \times 2 \text{ buah}$
- Jadi berat sendiri Alas $W_a = B_j \times \text{Luas penampang Alas} = 850 \text{ kg/m}^2 \times 0,05 \text{ m} \times 0,25 \text{ m} \times 0,80 = 8,5 \text{ kg}$
- Jadi berat sendiri tongkat $TW_a = 2 \times 8,5 \text{ kg} = 17 \text{ kg}$

Total Gaya Tekan untuk 1 (satu) titik.

- $P = W_t + W_l + W_a = 23,8 \text{ kg} + 3,1 \text{ kg} + 17 \text{ kg} = 43,9 \text{ kg} = 0,0439 \text{ ton}$
- Asumsi $m = P = 0,0439 \text{ ton}$
- $m = m \times g$ Dimana $g = \text{gravitasi} = 9,81 \text{ m/det}^2$
- $F_b = 0,0439 \text{ ton} \times 9,81 \text{ m/det}^2 = 0,430659 \text{ t.m/det}^2$

Analisa Pondasi Tiang Tongkat dengan Pendekatan Rumus Umum Pondasi Dangkal *Terzaghi*.

Untuk menganalisa pondasi tiang tongkat pada kondisi tanah lempung/lunak maka data tanah harus dimiliki. Pada umumnya *Terzaghi* menggunakan pasir dan lempung yang memiliki nilai ϕ dan c , untuk pondasi dangkal. Pondasi tiang tongkat digunakan pada kondisi tanah

lempung/lunak dengan asumsi nilai ϕ dan c bisa dianggap mendekati 0 (nol). dengan alasan karena tes yang sering dilakukan untuk tanah lempung adalah menggunakan tes konsolidasi dimana parameter kompresibilitas tanah bisa didapatkan. Beberapa Lokasi di Pontianak yang diambil sampel tanahnya meliputi sebagai berikut :

Tabel 2 Harga Rata-rata Sifat-sifat fisik Tanah di Kota Pontianak

No	Lokasi	Parameter Tanah	Harga Rata-rata
1.	Kompleks Universitas Panca Bhakti	a. Berat Jenis, G_s (gr/cm)	1,438
		b. Berat Volume, γ_{sat} (gr/cm ³)	1,322
		c. Kadar air, ω (%)	88,89
		d. Kohesi, c (kg/cm ²)	0,063

Sumber : Pramono, 2000, *Analisa Daya Dukung Cerucuk Pada Tanah Lempung Sebagai Perkuatan Konstruksi Sub Base Jalan Raya*, Skripsi, Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil Universitas Panca Bhakti, Pontianak.

No	Lokasi	Parameter Tanah	Harga Rata-rata
1.	Jln. R.E Martadimata, Pontianak Barat	a. Berat Jenis, G_s (gr/cm)	2,004
		b. Berat Volume, γ_{sat} (gr/cm ³)	1,520
		c. Kadar air, ω (%)	90,282
		d. Kohesi, c (kg/cm ²)	0,11
2.	Jln. Tanjung Raya, Pontianak Timur	a. Berat Jenis, G_s (gr/cm)	2,078
		b. Berat Volume, γ_{sat} (gr/cm ³)	1,655
		c. Kadar air, ω (%)	92,83
		d. Kohesi, c (kg/cm ²)	0,11
3.	Jln. 28 Oktober, Pontianak Utara	a. Berat Jenis, G_s (gr/cm)	2,139
		b. Berat Volume, γ_{sat} (gr/cm ³)	1,491
		c. Kadar air, ω (%)	83,708
		d. Kohesi, c (kg/cm ²)	0,13
4.	Jln. Sei Raya Dalam, Pontianak Selatan	a. Berat Jenis, G_s (gr/cm)	1,996
		b. Berat Volume, γ_{sat} (gr/cm ³)	1,662
		c. Kadar air, ω (%)	92,331
		d. Kohesi, c (kg/cm ²)	0,11

Sumber : Lazuardi, 1999, *Tinjauan Dinding Penahan Tanah Pada Konstruksi Jalan Raya Di Kotamadya Pontianak*, Skripsi, Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil Universitas Panca Bhakti, Pontianak.

Perhitungan Komplek Universitas Panca Bhakti

$$q_u = 1,3 \cdot c \cdot N_c + q \cdot N_q + 0,4 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$$

(untuk pondasi persegi) dimana
 ϕ , N_c , N_q , N_γ Nilai-nilai Notasi
 $\phi = 10^\circ$ ($N_c = 9,6; N_q = 2,7$;
 $N_\gamma = 1,2$)
 $c = 0,063 \text{ kg/cm}^2$
 $\gamma = 1,322 \text{ gr/cm}^3$
 $B = 80 \text{ cm} = 0,8 \text{ m}$
 $D_f = 1,5 \text{ m}$

Berdasarkan dari data-data yang ada maka analisa rumus *Terzaghi*

$$q_u = 1,3 \cdot c \cdot N_c + q \cdot N_q + 0,4 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$$

$$= 1,3(0,063)(9,6) + 1,5(1,322)(2,7) + (0,4 \cdot 1,322 \cdot 0,8 \cdot 1,2)$$

$$= 0,786 + 5,354 + 0,508 = 6,65 \text{ gr/cm}^2$$

Disebut daya Dukung Tanah (q_u) dari pendekatan rumus umum pondasi dangkal *Terzaghi* ($D_f \leq B$). Nilai ini dikonversi ke kg/m^2 menjadi $q_u = 67 \text{ kg/m}^2$.

Analisa Pondasi Tiang Tongkat Sebagai *Floating Foundation* dengan Hukum Hidraulika *Archimedes*.

Hukum *Archimedes* mengatakan bahwa. "Benda yang tercelup di dalam fluida akan mengalami gaya ke atas (gaya *Archimedes*) seberat fluida yang dipindahkannya". Dengan rumus umum sebagai berikut :

$$F_A = \rho \cdot g \cdot V$$

Nilai-nilai Notasi
 $F_A = \text{Gaya Archimedes (kg/m}^2\text{)}$
 $\rho = \text{massa jenis fluida} = 1000 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ t/m}^3$
 $g = \text{percepatan gravitasi} = 9,81 \text{ m/det}^2$
 $F_b = 0,430659 \text{ t.m/det}^2$
 $V = \text{volume (m}^3\text{)}$

Sesuai dengan dalil-dalil Hidraulika *Archimedes* sebagai berikut :

Dalil 1 mengatakan.

Jika $F_A = m \cdot g$ maka benda akan terendam.

Dalil 2 mengatakan.

Jika $F_A < m \cdot g$ Maka benda akan tenggelam.

Dalil 3 mengatakan.

Jika $F_A > m \cdot g$ Maka benda akan terapung.

Jadi hukum kesetimbangan, yaitu :

$$F_A = F_b$$

$$\rho \cdot g \cdot V = m \cdot g$$

$$1 \text{ t/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/det}^2 \cdot V = 0,0439 \text{ ton} \cdot 9,81 \text{ m/det}^2$$

$$9,81 \text{ m/det}^2 \cdot V = 0,430659 \text{ t.m/det}^2$$

$$V = \frac{0,430659 \text{ t.m/det}^2}{9,81 \text{ t.m/det}^2}$$

$$V = 0,0439 \text{ m}^3$$

Jadi :

$$F_A = \rho \cdot g \cdot V$$

$$= 1 \text{ t/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/det}^2 \cdot 0,0439 \text{ m}^3$$

$$F_A = 0,430659 \text{ t.m/det}^2$$

$F_A = 0,430659 \text{ t.m/det}^2$ terbukti sama dengan $F_b = 0,430659 \text{ t.m/det}^2$, jadi kondisi $F_A = F_b$ sesuai dengan dalil 1 (satu) maka pondasi akan terendam tetapi tidak tenggelam (*Floating Foundation*).

Analisa Pondasi Tiang Tongkat dengan Kombinasi Rumus Umum Pondasi Dangkal *Terzaghi* dengan Hukum Hidraulika *Archimedes*.

Dari perhitungan atau analisa sebelumnya telah didapat angka-angka sebagai berikut :

$$q_u = 67,0 \text{ kg/m}^2 = 0,067 \text{ t/m}^2$$

(didapat dari rumus *Terzaghi*).

▪ $P = 43,9 \text{ kg} = 0,0439 \text{ ton}$ (untuk satu titik)

Sedangkan luasnya bangunan adalah $A = 6 * 12 \text{ m}^2 = 72 \text{ m}^2$.

Dengan jumlah tiang tongkat/titik (n) = 91 titik, maka

$$P_u = P * n = 0,0439 \text{ ton} * 91 \text{ titik} = 3,9949 \text{ ton}$$

$$q_u = \frac{P_u}{A} = \frac{3,9949 \text{ ton}}{72 \text{ m}^2} = 0,0554 \text{ t/m}^2$$

Jadi analisa kombinasi Hukum Hidraulika *Archimedes* dengan rumus umum pondasi dangkal *Terzaghi* adalah sebagai berikut :

$$q_{u \text{ total}} = q_u + q_u^* = 0,067 \text{ t/m}^2 + 0,05584722 \text{ t/m}^2$$

$$q_{u \text{ total}} = 0,12284722 \text{ t/m}^2$$

Sedang nilai SF (*Safety Factor*) = 1,8 – 2,5 diambil SF = 2

$$\bar{q} = \frac{q_{u \text{ total}}}{SF} = \frac{0,12284722 \text{ t/m}^2}{2}$$

$$\bar{q} = 0,06142361 \text{ t/m}^2$$

$$P_{u \text{ izin}} = \bar{q} * A = 0,06142361 * 72 = 4,42249992 \text{ ton}$$

$$P_{u \text{ izin}} = 4,42249992 \text{ ton}$$

Untuk 1 (satu) titik maka :
 $n = 91$ titik

$$P_{\text{izin}} = \frac{P_{u \text{ izin}}}{n} = \frac{4,42249992 \text{ ton}}{91}$$

$$P_{\text{izin}} = 0,0485989 \text{ ton}$$

$$P < P_{\text{izin}}$$

$$P < P_{\text{izin}}$$

$$0,0439 \text{ ton} < 0,0485989 \text{ ton}$$

Kondisi AMAN.....(ok)

Artinya : Pondasi Tiang Tongkat memang aman digunakan pada kondisi tanah lempung /lunak karena daya dukung izin (kombinasi gaya *Archimedes* dan daya dukung tanah di kota Pontianak) lebih besar dari gaya berat pondasi tiang tongkat.

Perhitungan Lokasi Jalan R.E. Martadinata Pontianak Barat

$$q_u = 1,3.c.N_c + q \cdot N_q + 0,4 \gamma.B.N_\gamma$$

(untuk pondasi persegi) dimana \emptyset , N_c , N_q , N_γ

Nilai $\emptyset = 10^0$ ($N_c = 9,6$; $N_q = 2,7$; $N_\gamma = 1,2$)

$$c = 0,11 \text{ kg/cm}^2$$

$$B = 80 \text{ cm} = 0,8 \text{ m}$$

$$\gamma = 1,520 \text{ gr/cm}^3$$

$$D_f = 1,5 \text{ m}$$

Berdasarkan dari data-data yang ada maka analisa rumus *Terzaghi*

$$q_u = 1,3 * c * N_c + q * N_q + 0,4 * \gamma * B * N_\gamma = 1,3(0,11)(9,6) + 1,5(1,520)(2,7) + (0,4 * 1,520 * 0,8 * 1,2) = 1,373 + 6,156 + 0,584 = 8,1 \text{ gr/cm}^2$$

Disebut daya Dukung Tanah (q_u) dari pendekatan rumus umum pondasi dangkal *Terzaghi* ($D_f \leq B$). Nilai ini dikonversi ke kg/m^2 menjadi $q_u = 81 \text{ kg/m}^2$.

Untuk analisa Pondasi Tiang Tongkat Sebagai *Floating Foundation* dengan Hukum Hidraulika *Archimedes*. Metode sama seperti di atas

Analisa Pondasi Tiang Tongkat dengan Kombinasi Rumus Umum Pondasi Dangkal *Terzaghi* dengan Hukum Hidraulika *Archimedes*.

Dari perhitungan atau analisa sebelumnya telah didapat angka-angka sebagai berikut :

$$q_u = 81 \text{ kg/m}^2 = 0,081 \text{ t/m}^2$$

(didapat dari rumus *Terzaghi*).

$$P = 43,9 \text{ kg} = 0,0439 \text{ ton}$$
 (untuk satu titik)

$$\text{Luasnya bangunan } A = 6 * 12 \text{ m}^2 = 72 \text{ m}^2$$

Dengan jumlah tiang tongkat/titik (n) = 91 titik, maka

$$P_u = P * n = 0,0439 \text{ ton} * 91 \text{ titik} = 3,9949 \text{ ton}$$

$$q_u^* = \frac{P_u}{A} = \frac{3,9949 \text{ t}}{72 \text{ m}^2} = 0,055484722 \text{ t/m}^2$$

Jadi analisa kombinasi Hukum Hidraulika *Archimedes* dengan rumus umum pondasi dangkal *Terzaghi* adalah sebagai berikut :

$$q_{u \text{ total}} = q_u + q_u^* = 0,081 \text{ t/m}^2 + 0,05584722 \text{ t/m}^2$$

$$q_{u \text{ total}} = 0,13684722 \text{ t/m}^2$$

Sedang nilai SF (*Safety Factor*) = 1,8 – 2,5 diambil

$$SF = 2$$

$$q = \frac{q_{u \text{ total}}}{SF} = \frac{0,13684722 \text{ t/m}^2}{2}$$

$$q = 0,06842361 \text{ t/m}^2$$

$$q = 0,06842361 \text{ t/m}^2$$

$$P_{u \text{ izin}} = \bar{q} * A = 0,06842361 * 72$$

$$P_{u \text{ izin}} = 4,9294992 \text{ ton}$$

Untuk 1 (satu) titik maka :

$$n = 91 \text{ titik}$$

$$P_{\text{izin}} = \frac{P_{u \text{ izin}}}{n} = \frac{4,9294992 \text{ ton}}{91}$$

$$P_{\text{izin}} = 0,054137361 \text{ ton}$$

$$P < P_{\text{izin}}$$

$$0,0439 \text{ ton} < 0,054137361 \text{ ton}$$

$$0,0439 \text{ ton} < 0,054137361 \text{ ton}$$

$$P < P_{\text{izin}}$$

Artinya : Pondasi tiang tongkat memang aman digunakan pada kondisi tanah lempung /lunak, karena daya dukung izin (kombinasi gaya *Archimedes* dan daya dukung tanah di kota Pontianak) lebih besar dari gaya berat pondasi tiang tongkat.

Perhitungan Lokasi Jln. Tanjung Raya Pontianak Timur

$$q_u = 1,3.c.N_c + q \cdot N_q + 0,4 \gamma.B.N_\gamma$$

(untuk pondasi persegi)

$$\text{Untuk } \emptyset = 10^0 \text{ (} N_c = 9,6 ; N_q = 2,7 ; N_\gamma = 1,2 \text{)}$$

$$c = 0,11 \text{ kg/cm}^2$$

$$\gamma = 1,655 \text{ gr/cm}^3$$

$$B = 80 \text{ cm} = 0,8 \text{ m}$$

$$D_f = 1,5 \text{ m}$$

Berdasarkan dari data-data yang ada maka analisa rumus *Terzaghi*

$$q_u = 1,3 * c * N_c + q * N_q + 0,4 * \gamma * B * N_\gamma = 1,3(0,11)(9,6) + 1,5(1,655)(2,7) + (0,4 * 1,655 * 0,8 * 1,2)$$

$$= 1,3(0,11)(9,6) + 1,5(1,655)(2,7) + (0,4 * 1,655 * 0,8 * 1,2)$$

$$= 1,3(0,11)(9,6) + 1,5(1,655)(2,7) + (0,4 * 1,655 * 0,8 * 1,2)$$

$$= 1,373 + 6,703 + 0,636 = 8,7 \text{ gr/cm}^2$$

Disebut daya Dukung Tanah (q_u) dari pendekatan rumus umum pondasi dangkal *Terzaghi* ($D_f \leq B$). Nilai ini dikonversi ke kg/m^2 menjadi $q_u = 87 \text{ kg/m}^2$.

Untuk analisa Pondasi Tiang Tongkat Sebagai *Floating Foundation* dengan Hukum Hidraulika *Archimedes*. Metode sama seperti di atas

Analisa Pondasi Tiang Tongkat dengan Kombinasi Rumus Umum Pondasi Dangkal *Terzaghi* dengan Hukum Hidraulika *Archimedes*.

Dari perhitungan atau analisa sebelumnya telah didapat angka-angka sebagai berikut :

$$q_u = 87 \text{ kg/m}^2 = 0,087 \text{ t/m}^2 \text{ (didapat dari rumus } Terzaghi \text{)}$$

$$P = 43,9 \text{ kg} = 0,0439 \text{ ton (untuk satu titik)}$$

$$A = 6 * 12 \text{ m}^2 = 72 \text{ m}^2.$$

Dengan jumlah tiang tongkat/titik (n) = 91 titik, maka

$$P_u = P * n = 0,0439 \text{ ton} * 91 \text{ titik} = 3,9949 \text{ ton}$$

$$q_u^* = \frac{P_u}{A} = \frac{3,9949}{72} = 0,055484722 \text{ t/m}^2.$$

Jadi analisa kombinasi Hukum Hidraulika *Archimedes* dengan rumus umum pondasi dangkal *Terzaghi* adalah sebagai berikut :

$$q_{u \text{ total}} = q_u + q_u^* = 0,087 \text{ t/m}^2 + 0,055484722 \text{ t/m}^2$$

$$q_{u \text{ total}} = 0,14284722 \text{ t/m}^2$$

Sedang nilai SF (*Safety Factor*) = 1,8 - 2,5 diambil SF = 2

$$q = \frac{q_{u \text{ total}}}{SF} = \frac{0,14284722 \text{ t/m}^2}{2}$$

$$q = 0,07142361 \text{ t/m}^2$$

$$P_{u \text{ izin}} = q * A$$

$$= 0,07142361 * 72$$

$$P_{u \text{ izin}} = 5,14249992 \text{ ton}$$

Untuk 1 (satu) titik maka :

$$n = 91 \text{ titik}$$

$$P_{\text{izin}} = \frac{P_{u \text{ izin}}}{n}$$

$$= \frac{5,14249992}{91}$$

$$P_{\text{izin}} = 0,056510988 \text{ ton}$$

$$\text{Kontrol : } P < P_{\text{izin}}$$

$$0,0439 \text{ ton} < 0,056510988 \text{ ton}$$

$$0,0439 < 0,056510988 \text{ ton}$$

$$\text{Kondisi AMAN.....(ok)}$$

$$0,0439 < 0,056510988 \text{ ton}$$

$$\text{Kondisi AMAN.....(ok)}$$

Artinya :

Pondasi tiang tongkat memang aman digunakan pada kondisi tanah lempung /lunak, karena daya dukung izin (kombinasi gaya *Archimedes* dan daya dukung tanah di kota Pontianak) lebih besar dari gaya berat pondasi tiang tongkat.

Perhitungan Lokasi Jalan. 28 Oktober Pontianak Utara

$$q_u = 1,3.c.N_c + q . N_q + 0,4 \gamma . B . N_\gamma \text{ (untuk pondasi persegi)}$$

$$\text{untuk } \emptyset = 10^0 \text{ (} N_c = 9,6; N_q = 2,7; N_\gamma = 1,2 \text{)}$$

$$c = 0,13 \text{ kg/cm}^2$$

$$\gamma = 1,491 \text{ gr/cm}^3$$

$$B = 80 \text{ cm} = 0,8 \text{ m}$$

$$D_f = 1,5 \text{ m}$$

Berdasarkan dari data-data yang ada maka analisa rumus *Terzaghi*

$$q_u = 1,3 * c * N_c + q * N_q + 0,4$$

$$* \gamma * B * N_\gamma$$

$$= 1,3(0,13)(9,6) +$$

$$1,5(1,491)(2,7) +$$

$$(0,4 * 1,491 * 0,8 * 1,2)$$

$$= 1,622 + 6,039 + 0,573 = 8,2$$

$$\text{gr/cm}^2$$

Disebut daya Dukung Tanah (q_u) dari pendekatan rumus umum pondasi dangkal *Terzaghi* ($D_f \leq B$). Nilai ini dikonversi ke kg/m^2 menjadi $q_u = 82 \text{ kg/m}^2$.

Untuk analisa Pondasi Tiang Tongkat Sebagai *Floating Foundation* dengan Hukum Hidraulika *Archimedes*. Metode sama seperti sebelumnya.

Analisa Pondasi Tiang Tongkat dengan Kombinasi Rumus Umum Pondasi Dangkal *Terzaghi* dengan Hukum Hidraulika *Archimedes*.

Dari perhitungan atau analisa sebelumnya telah didapat angka-angka sebagai berikut :

$$q_u = 82 \text{ kg/m}^2 = 0,082 \text{ t/m}^2 \text{ (didapat dari rumus } Terzaghi \text{)}$$

$$P = 43,9 \text{ kg} = 0,0439 \text{ ton (untuk satu titik)}$$

$$A = 6 * 12 \text{ m}^2 = 72 \text{ m}^2.$$

Dengan jumlah tiang tongkat/titik (n) = 91 titik, maka

$$P_u = P * n = 0,0439 \text{ ton} * 91 \text{ titik} = 3,9949 \text{ ton}$$

$$q_u^* = \frac{P_u}{A} = \frac{3,9949}{72} = 0,055484722 \text{ t/m}^2.$$

Jadi analisa kombinasi Hukum Hidraulika *Archimedes* dengan rumus umum pondasi dangkal *Terzaghi* adalah sebagai berikut :

$$q_{u \text{ total}} = q_u + q_u^*$$

$$= 0,082 \text{ t/m}^2 +$$

$$0,055484722 \text{ t/m}^2$$

$$q_{u \text{ total}} = 0,137484722 \text{ t/m}^2$$

Sedang nilai SF (*Safety Factor*) = 1,8 - 2,5 diambil SF = 2

$$\bar{q} = \frac{q_{u \text{ total}}}{SF} =$$

$$\frac{0,137484722}{2}$$

$$\bar{q} = 0,068742361 \text{ t/m}^2$$

$$P_{u \text{ izin}} = \bar{q} * A$$

$$= 0,068742361 * 72$$

$$P_{u \text{ izin}} = 4,949449992 \text{ ton}$$

$$\text{Untuk 1 (satu) titik maka :}$$

$$n = 91 \text{ titik}$$

$$P_{\text{izin}} = \frac{P_{u \text{ izin}}}{n} =$$

$$\frac{4,949449992}{91}$$

$$P_{\text{izin}} = 0,05438956 \text{ ton}$$

$$\text{Kontrol : } P < P_{\text{izin}}$$

$$0,0439 \text{ ton} < 0,05438956 \text{ ton}$$

$$0,0439 < 0,05438956 \text{ ton}$$

$$\text{Kondisi AMAN.....(ok)}$$

$$0,0439 < 0,05438956 \text{ ton}$$

$$\text{Kondisi AMAN.....(ok)}$$

Artinya :

Pondasi tiang tongkat memang aman digunakan pada kondisi tanah lempung /lunak, karena daya dukung izin (kombinasi gaya *Archimedes* dan daya dukung tanah di kota Pontianak) lebih besar dari gaya berat pondasi tiang tongkat.

Perhitungan Lokasi Jln. Sungai Raya Dalam Pontianak Selatan

$$q_u = 1,3.c.N_c + q . N_q + 0,4 \gamma . B . N_\gamma$$

$$\text{Nilai } \emptyset = 10^0 \text{ (} N_c = 9,6; N_q = 2,7; N_\gamma = 1,2 \text{)}$$

$$N_\gamma = 1,2)$$

$$c = 0,11 \text{ kg/cm}^2$$

$$\gamma = 1,662 \text{ gr/cm}^3$$

$$B = 80 \text{ cm} = 0,8 \text{ m}$$

$$D_f = 1,5 \text{ m}$$

Berdasarkan dari data-data yang ada maka analisa rumus *Terzaghi*

$$q_u = 1,3 \cdot c \cdot N_c + q \cdot N_q + 0,4$$

$$\begin{aligned} * \gamma \cdot B \cdot N_\gamma &= 1,3(0,11)(9,6) + \\ &= 1,5(1,662)(2,7) + \\ &= (0,4 \cdot 1,662 \cdot 0,8 \cdot 1,2) + \\ &= 1,373 + 6,731 + 0,638 = 8,7 \\ &\text{gr/cm}^2 \end{aligned}$$

Disebut daya Dukung Tanah (q_u) dari pendekatan rumus umum pondasi dangkal *Terzaghi* ($D_f \leq B$). Nilai ini dikonversi ke kg/m^2 menjadi $q_u = 87 \text{ kg/m}^2$.

Analisa Pondasi Tiang Tongkat dengan Kombinasi Rumus Umum Pondasi Dangkal *Terzaghi* dengan Hukum Hidraulika *Archimedes*.

Dari perhitungan atau analisa sebelumnya telah didapat angka-angka sebagai berikut :

$$q_u = 87 \text{ kg/m}^2 = 0,087 \text{ t/m}^2$$

$$P = 43,9 \text{ kg} = 0,0439 \text{ ton (untuk satu titik)}$$

$$A = 6 \cdot 12 \text{ m}^2 = 72 \text{ m}^2.$$

Dengan jumlah tiang tongkat/titik (n) = 91 titik, maka

$$P_u = P \cdot n = 0,0439 \text{ ton} \cdot 91 \text{ titik} = 3,9949 \text{ ton}$$

$$q_u^* = \frac{P_u}{A} = \frac{3,9949}{72} = 0,055484722 \text{ t/m}^2.$$

Jadi analisa kombinasi Hukum Hidraulika *Archimedes* dengan rumus

umum pondasi dangkal *Terzaghi* adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} q_{u \text{ total}} &= q_u + q_u^* \\ &= 0,087 \text{ t/m}^2 + 0,055484722 \\ &\text{t/m}^2 \end{aligned}$$

$$q_{u \text{ total}} = 0,142484722 \text{ t/m}^2$$

Sedang nilai SF (*Safety Factor*) = 1,8 – 2,5 diambil SF = 2

$$\bar{q} = \frac{q_{u \text{ total}}}{\text{SF}} = \frac{0,142484722}{2}$$

$$\bar{q} = 0,071242361 \text{ t/m}^2$$

$$P_{u \text{ izin}} = \bar{q} \cdot A = 0,071242361 \cdot 72$$

$$P_{u \text{ izin}} = 5,129449992 \text{ ton}$$

Untuk 1 (satu) titik maka :

$$n = 91 \text{ titik}$$

$$P_{u \text{ izin}} = \frac{P_{u \text{ izin}}}{n} = \frac{5,129449992}{91} = 0,056367582 \text{ ton}$$

Kontrol :

$$P < P_{u \text{ izin}} \\ 0,0439 \text{ ton} < 0,056367582 \text{ ton}$$

Kondisi AMAN.....(ok)

Artinya :

Pondasi tiang tongkat aman digunakan pada kondisi tanah lempung /lunak karena daya dukung izin (kombinasi gaya *Archimedes* dan daya dukung tanah di kota Pontianak) lebih besar dari gaya berat pondasi tiang tongkat.

Evaluasi Perbandingan Daya Dukung Batas (q_u) Teoritis dengan Hasil Uji Beban Di Lapangan.

Berdasarkan hasil uji beban (loading test) di lapangan, pondasi tiang tongkat yang mempunyai ukuran dimana lebar $B = 80 \text{ cm}$ dan panjang $L = 200 \text{ cm}$, setelah diberi beban 1750 kg. Setelah pembacaan grafik

kurva maksimum dan jari-jari minimum, maka daya dukung ultimatenya 1440 kg kemudian dibagi dengan angka keamanan 2,5 daya dukung (q_u (net yang ada)) yang diperbolehkan adalah 576 kg. Jadi perbandingan antara q_u (net teori) dan q_u (net yang ada) adalah

Data-data Perhitungan :

Nilai $\phi = 10^\circ$ ($N_c = 9,6$; $N_q = 2,7$; $N_\gamma = 1,2$)

$$B = 80 \text{ cm} = 0,8 \text{ m}$$

$$L = 200 \text{ cm} = 2 \text{ m}$$

$$D_f = 150 \text{ cm} = 1,5 \text{ m}$$

$$c = 0,063 \text{ kg/cm}^2$$

$$q_u \text{ (net yang ada)} = 576 \text{ kg}$$

$$q_u \text{ (net)} = C_u \cdot \lambda_{cs} \cdot \lambda_{cd} \cdot N_c$$

$$\lambda_{cs} = 1 + \frac{B}{L} \cdot x \cdot \frac{N_q}{N_c}$$

$$\lambda_{cd} = \lambda_{qd} \cdot \frac{1 - \lambda_{qd}}{N_q \tan \phi}$$

$$\lambda_{qd} = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \left(\frac{D_f}{B} \right)$$

$$\text{untuk mencari nilai } \lambda_{cs} = 1 + \frac{0,8}{2} \cdot x \cdot \frac{2,7}{9,6}$$

$$1,113 \quad \lambda_{cs} =$$

$$\text{untuk mencari nilai } \lambda_{qd} = 1 + 2 \tan 10 (1 - \sin 10)^2 \left(\frac{1,5}{0,8} \right)$$

$$= 1 + 2(0,18)(0,68)(1,86)$$

$$\lambda_{qd} = 1,455$$

untuk nilai daya dukung netto (q_u (net)) adalah :

$$q_u \text{ (net)} = C_u \cdot \lambda_{cs} \cdot \lambda_{cd} \cdot N_c$$

$$= (0,063)(1,113)(1,455)(9,6)$$

$$q_u \text{ (net)} = 0,979 \text{ kg} = 9,796 \text{ kg}$$

Jadi, untuk uji beban (load test) lapangan dibandingkan dengan teori adalah :

$$\frac{q_u \text{ (net-teori)}}{q_u \text{ (net yang ada)}} = \frac{9,796 \text{ kg}}{576 \text{ kg}} = 0,017$$

Dari hasil perhitungan diatas menunjukkan adanya kesamaan antara q_u yang diperkirakan secara teoritis dengan q_u yang ditentukan dari hasil uji beban lapangan. Variasi yang sangat kecil yang timbul antara teori dan hasil uji beban mungkin disebabkan perkiraan harga c yang sama.

PENUTUP Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan atau analisa pendekatan rumus umum dangkal *Terzaghi* dan hukum hidraulika *Archimedes* dapat ditarik kesimpulana sebagai berikut :

1. Berdasarkan hasil perhitungan rumus umum pondasi dangkal *Terzaghi* ($D_f \leq B$) didapat nilai daya dukung tanah (q_u) = 6,65 gr/cm^2 atau = 67 kg/m^2 . Artinya daya dukung tanah (q_u) mampu menahan beban;
2. Bahwa dengan pendekatan hukum hidraulika *Archimedes*, besar gaya tekan ke atas (F_A) = 0,430659 t.m/det^2 sama dengan besar gaya berat pondasi (F_B) = 0,430659 t.m/det^2 , terbukti pondasi tiang tongkat sebagai *Floating Foundation*, sehingga

sesuai dengan dalil hidraulika *Archimedes* 1 dan 3 yaitu benda akan terendam tetapi tidak tenggelam, artinya pondasi tiang tongkat tidak terlalu berat.

3. Faktor kedalaman (D_f) mempengaruhi rumus *Terzaghi*, khususnya pada kondisi tanah lempung atau lunak, semakin besar D_f maka daya dukung tanah (q_u) dan gaya *Archimedes* (F_A) akan semakin besar juga. Artinya D_f berbanding lurus dengan q_u dan F_A .
4. Berdasarkan perhitungan rumus umum pondasi dangkal *Terzaghi* kombinasi hukum hidraulika *Archimedes*, pondasi tiang tongkat aman di gunakan pada kondisi tanah lempung atau lunak di kota Pontianak, karena daya dukung izin (kombinasi gaya *Archimedes* dan daya dukung tanah lempung/lunak) lebih besar dari gaya berat pondasi tiang tongkat ($P < P_{izin}$) = 0,0439 ton < 0,0485989, dari semua contoh lokasi.
5. Berdasarkan hasil perhitungan perbandingan antara q_u yang diperkirakan secara teoritis dengan q_u dari hasil uji beban di lapangan, sebesar 0,017 % membuktikan variasi yang sangat kecil antara teori dan hasil uji beban yang timbul disebabkan perkiraan harga c yang sama.

Saran-saran

1. Perlunya dilakukan penelitian lebih lanjut untuk menghasilkan modifikasi pondasi tiang tongkat, sehingga model pondasi yang

lebih kuat dan kokoh, dengan diberi beban yang besar, bangunan masih bisa bertahan terhadap penurunan pada jangka waktu yang lebih lama pada kondisi tanah lempung (lunak).

2. Sebaiknya untuk penelitian selanjutnya bisa di rekomendasikan rumus *Darcy* untuk digunakan dan hukum-hukum hidraulika lainnya. Untuk rumus pondasi dangkal bisa juga menggunakan pendekatan rumus lainnya selain *Terzaghi* yang sudah dimodifikasi dengan faktor bentuk dengan kondisi tanah tertentu, seperti tanah gambut atau rawa.
3. Untuk tanah seperti di Kalimantan Barat, khususnya kota Pontianak pondasi tiang tongkat berlaci dilengkapi alas merupakan alternatif pilihan yang baik, terutama untuk bangunan perumahan sederhana, rumah tinggal yang sifatnya permanen, , bangunan bertingkat tiga, maupun ruko (rumah dan toko), tidak menutup kemungkinan bangunan jembatan dengan bentang dan dimensi tertentu. Kecuali bangunan menggunakan dinding batako dan sejenisnya atau bangunan yang atasnya menggunakan struktur beton bertulang.
4. Pemasangan pondasi tiang tongkat untuk tanah lempung (lunak) sebaiknya di laksanakan pada musim kemarau, sehingga bisa mencapai ke kondisi tanah yang agak keras, dan bisa juga

mengurangi penurunan yang akan terjadi.

DAFTAR PUSTAKA

- Bowles, J.E., 1985, *Sifat-sifat Fisis dan Geoteknik Tanah*, Terjemahan oleh J. K. Hainim, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- , 1982, *Analisa dan Desain Pondasi*, Terjemahan oleh Pantur Silaban, Ph.D., Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Braja M. Das, 1988, *Mekanika Tanah (Prinsi-prinsip Rekayasa Geoteknik)*, Jilid 1. Terjemahan Noor Endah, Indrasurya B. Mochtar., Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Departemen PU., *Peraturan Konstruksi Kayu Indonesia NI-5 PKKI 1961*, Dirjen Ciptakarya, Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan, Bandung.
- Heinz Frick, Ir., 1980, *Ilmu Konstruksi Bangunan 1*, Kanisius, Yogyakarta.
- Ranald V. Giles., Ir. Herman W. Soemitro, 1977., *Mekanika Fluida dan Hidraulika*, Erlangga, Jakarta.
- R. F. Craig., 1987, *Mekanika Tanah*, Edisi keempat, terjemahan Budi Susilo Soepandji, Dr. Ir. Penerbit Erlangga, Jakarta.

- Ranald V. giles, B.S., M.S. in C.E. 1976, *Mekanika Fluida dan Hidraulika*, Erlangga, Jakarta.
- R.H. Dugdale., Ir. Bambang Priambodo, 1986. *Mekanika Fluida*, Erlangga, Jakarta.
- Rudy Gunawan, Ir.1990, *Pengantar Teknik Fondasi*, Kanisius, Yogyakarta.
- Suyono Sosrodarsono, Ir., Kazuto Nakazawa. 1980, *Mekanika Tanah dan Teknik Pondasi*, terjemahan Ir. L. Taulu dkk, Penerbit Pradnya Paramita, Jakarta.
- , 1994, *Mekanika Tanah (Prinsi-prinsip Rekayasa Geoteknik)*, Jilid 2. Terjemahan Noor Endah, Indrasurya B. Mochtar., Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Sunggono kh, Ir. 1984, *Mekanika Tanah*, Penerbit Nova, Bandung.
- Triatmojo, B., 1996, *Hidraulika I*, Beta Offset, Yogyakarta.
- Thomas Krist, Dr. Ing., Dines Ginting. 1989, *Hidraulika Ringkas dan jelas*, Erlangga, Jakarta.
- Wesley, L.D, Dr. Ir., 1997, *Mekanika Tanah*, BPPU, Jakarta.
- Zaianal, A.Z., 1993, *Cara Terbaik Untuk Membangun Rumah*, Gramedia, Jakarta

AUTOMATION SYSTEMS DESIGN BASED ON OPERATION MODES USING COLORED PETRI NET: A FORMAL APPROACH

Seno D. Panjaitan

Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering
Tanjungpura University, Pontianak
Email: senopanjaitan@gmail.com

ABSTRACT

Operation modes handling is one of the important tasks in automation systems. Some guidelines for the definition and handling of operation modes are currently proposed by academicians and related organizations in informal way. The informal design may cause misconception or misunderstanding in the implementation when the operation modes are being considered. Besides, control logic evaluation is difficult to be done if the model itself is informal. This paper proposes a new formal modeling approach of automation design considering operation modes based on Colored Petri Net (CPN). The approach considers the schedule of elementary mechatronic functions which are used to control the process. By the formal approach, some design properties can be verified in terms of the model's size, home marking, deadlock, and fairness. As an illustration, a product selection control in a lab scale implementation is taken into account to present how to use the proposed method.

Keywords: operation modes, automation system, verification, colored Petri net

INTRODUCTION

In automation systems, there are always several Operation Modes (OMs) which are used to manage the variation of control strategy based on each mode. Inefficiencies of cost and time will arise if moving from one mode to another is not managed properly. The relationship of states inside a mode should also be described clearly. Besides, the use of a common notation is very important to give clear semantics and to reduce the misunderstanding among people involved in automation systems

design or analysis. An OMs guideline will be prominent to improve comprehensibility of the control strategies.

Currently, there are several system architectures that have been implemented in automation systems. In a centralized automation system a large number of sensors and actuators are handled by using only a controller. Therefore, flexibility of the developed system is very limited. Traditional Distributed Control Systems (DCS) using modular controllers with a central supervision

system were the first step to solve this problem. Such systems however tend to be developed using large monolithic software packages which are generally difficult to be integrated with a new application. Concisely, centralized and traditional distributed systems are hard to modify and extend and do not offer the high degree of flexibility needed in advanced automation system. Today, embedded controllers as well as fast and reliable communication networks are already available. These technologies enable the development of Distributed Automation Systems (DAS) by providing a higher flexibility and re-configurability.

Strategies to handle the logic control both locally (i.e. with one controller) or globally (i.e. overall system) are tend to be more complex when OMs are considered. One main factor that causes this complexity is unavailability of the OMs guideline. Therefore, many previous strategies usually were limited their approach by considering only a normal operation or one mode of the system. Therefore, a comprehensible design guideline should be defined. The guideline can be used to face future problems in the design when some modes must be considered in the design and implementation. Furthermore, a formal model for the design is needed to support the analysis of some design properties. As the modeling tool, a high-level Petri net modeling technique namely Colored Petri Net (CPN) was considered in this research.

CURRENT OMs GUIDELINE FOR AUTOMATION SYSTEM: A REVIEW

In automation systems, operation modes determine how the system (or sub-systems thereof) will operate in response to the commands that are issued to it. For a given system, the possible OMs as well as the corresponding behavior have to be specified. In the DAS, this specification needs to consider the OMs of each sub-system where different sub-systems may possess different OMs. Moreover, it could be necessary to define some OMs for the entire system either by defining additional modes for it or by synchronizing OMs of the sub-systems via the system communication network. For instance, an emergency stop issued by a sub-system due to a critical situation may lead to stop the overall system via system network. Current guidelines related to OMs are listed in Table 1. GEMMA is a guideline for planning the OMs and stand-still modes using a design form. It includes four state groups: normal operation, standstill state, fault states and shut down (no power supply of the control). The proposed design process using this approach is based on three steps. First Step: the regarded operation modes are selected in design form based on the requirements of the process to be controlled. Second Step: the transitions and switching conditions between states (modes) are defined. Third Step: the filled design form along with additional specifications of the modes is transformed into a model such as

Graficet or Petri net. Based on this model, the implementation is started into low level languages. GEMMA is quite general and a manual process,

i.e. there are no tool supporting it directly hence, the integration into its implementation becomes difficult

Table 1 Overview of the Available OMs Guidelines

Guideline	Application	Comprehensibility	Verification	Formal Approach
GEMMA [1]	Centralized automation (general)	Good (Provide a form to be fulfilled manually for design)	No	No
ISA S88 [2]	Batch Process	Good	No	No
PackML [3]	Packaging	Good	No	No
Our Previous approach [4,5]	Centralized and Distributed Automation systems	Good (Provide a template model for OMs design)	Manual	Semi-formal using Unified Modeling Language

Another guideline for OMs is the S88 standard from ISA. It used specifically to guide a development process for batch control system. S88 considers three modes for procedural elements (i.e., automatic, semi-automatic and manual) and two modes for basic control (i.e., automatic and manual). A mode in S88 determines how equipment units and procedural elements respond to the given command and how they operate. There are two important elements in a mode, i.e., procedural states and commands. In procedural states, four kinds of states are employed: *initial*, *final*, *transient* and *quiescent*. The *initial state* is a position where the process is started or launched. The *final state* is a status where the process is completed, e.g. state complete. The *transition state* is a related activity to accomplish

particular tasks and its state name always ends with "ing", e.g. holding, restarting, running, pausing, stopping, and aborting. The *quiescent* state confirms the status when an activity has been done and contains no process activity. For instance, some states named held, paused, stopped, and aborted are categorized as quiescent. Additionally, the proposed commands used to enable a state of activity include start, stop, hold, restart, abort, reset, pause and resume. The OMs allow modular batch automation implementing a series of control steps (traditional DCS).

The third guideline is named PackML which is proposed by Open Modular Architecture Controls (OMAC) users group. The guideline is specialized for packaging machinery automation. Three proposed modes

are automatic, maintenance, and manual, while three categories of state are acting state, wait state, and dual state. Some valid states are *Stopping*, *Stopped*, *Aborting*, *Aborted*, *Resetting*, *Idle*, *Starting*, *Execute*, *Suspending*, *Suspended*, *Unsuspending*, *Holding*, *Held*, *Unholding*, *Clearing*, *Completing* and *Complete*. The transitions between states are the result of manual intervention, changes of the process status, or completion of a mode state. Furthermore, two different modes are defined: unit control and procedural mode. A mode manager has also been included to manage unit mode change.

For the three presented approaches, the provided guidelines are still informal hence there is no way to verify the logical behavior of the system. The formalization should be performed to provide verifiable design in order to ease analysis and evaluation of the automation systems. Therefore, the extension of the guidelines is proposed in this paper.

FORMAL METHOD BASED ON COLORED PETRI NET (CPN)

Petri net method is a mathematical tool for system modeling which involves some characteristics such as concurrency, non-determinism, communication and synchronization. It has been successfully used for concurrent and parallel systems modeling and analysis, communication protocols, performance evaluation and fault-tolerant systems. One of the powerful modeling which supports high-level Petri net modeling is CPN.

A CPN model can be translated into a CPN tuple, and vice versa [6]. The tuple form is adequate to formulate general definitions and prove the theorems. The graph form is adequate to construct a CPN model for a specific system. A CPN consist of 9-tuple as follows:

$$CPN = (\Sigma, P, T, A, N, C, G, E, I)$$

where

- Σ : A finite set of non-empty **types** called color sets which determine the data values, the operations and functions that can be used in the net expressions.
- P : A finite set of **places**.
- T : A finite set of **transitions**.
- A : A finite set of **arcs**, $P \cap T = P \cap A = T \cap A = \emptyset$.
- N : A **node** function which is defined from A into $P \times T \cup T \times P$ and maps each arc into a pair where the first element is the source node and the second one is the destination node.
- C : A **color** function which is defined from P into Σ and maps each place, p , to a type $C(p)$.

- G : A **guard** function from T into expressions
 $\forall t \in T : [Type(G(t)) = B \wedge Type(Var(G(t))) \subseteq \Sigma]$.
- E : An **arc expression** function where
 $\forall a \in A : [Type(E(a)) = C(p)_{MS} \wedge Type(Var(E(a))) \subseteq \Sigma]$ where p is the place of N(a).
- I : An **initialization** function is defined from P where
 $\forall p \in P : [Type(I(p)) = C(p)_{MS}]$.

A CPN consists of *places*, *transitions*, and *arcs*. *Input arcs* connect places with transitions, while *output arcs* connect a transition to a particular place. Places may contain *tokens* in which the current state of the modeled system (the *marking*) is given by the number of tokens in each place. The state of the system will be changed if one or more transitions can fire. Transitions are only allowed to fire if they are *enabled* in which all the preconditions for the transition must be fulfilled (there are enough tokens available in the input places). It must be clear that the “state” of the CPN is the so-called “marking” of places.

Places drawn as ellipses or circles represent the states of the running process. Their names have no formal meaning but have huge practical importance on readability and are written inside the ellipses. **Types** (color set) determine the data type of the related places. The types of CPN can be arbitrarily complex, e.g. in a single place, which could contain not only integers but also text strings, index variables and so on.

Marking is a state of a CPN. It consists of a number of tokens positioned (distributed) on the

individual places. Each token carries a value (color), which belongs to the type of the place on which the token resides. The tokens presented on a particular place are called the marking of that place. It sometimes refers to token values as token colors and data types as color sets. This is a metaphoric picture where the tokens of a CPN are distinguishable from each other, i.e. “colored”, in contrast to low-level Petri nets which have “black” indistinguishable tokens. **Initial marking** describes the initial state of the system.

In CPN tools, there are three inscriptions that may be associated with a place. Two are optional (i.e., initial marking and place name) and one is required (i.e., color set). The initial marking inscription is a multi-set expression that specifies the initial tokens for a place. The color set inscription determines the type of all the tokens that can be put in the place.

Modeling of action consists of three elements: transition, arc and its expressions. **Transitions** which are drawn as rectangles represent the actions of a CPN. Their names are written inside the rectangles. **Arcs**

connect the transitions to the places and vice versa. The actions of a CPN consist of occurrences of transitions. An occurrence of a transition removes tokens from places connected to incoming arcs (input places) and adds tokens to places connected to outgoing arcs (output places), thereby changing the marking (state) of the CPN. The exact number of tokens is added and removed by the occurrence of a transition, and their data values are determined by the **arc expressions**, which are positioned next to the arcs.

There are four different inscriptions for transitions: transition name, guard, time, and code segment. The transition name inscription is optional, but if we want to analysis the state space then all the transitions must have different names. A guard inscription is a Boolean expression (or a list of Boolean expression) that evaluates to true or false. Guards are used for tests on input arc inscription variables. The time inscription represents the timing condition that have to be fulfilled before moving to the next state. Finally, the code segment inscriptions used to put a more complex computational algorithm that has to be processed in order to enable the transition and update the data.

CPN also offers formal verification methods known as state space analysis and invariant analysis. The analysis result will prove that a system has a certain set of behavioral properties. The use of formal verification is often restricted to the most important sub-systems or the

most important aspects of a complex system. Three important analysis tools in CPN are simulation, performance, and state space. The state space analysis was the analysis method used in this research.

State space analysis is one of the most developed analysis methods for Petri nets. State space could help us to investigate the behavior of individual CPN (dynamic properties), i.e. whether it is possible to reach a marking in which no step is enabled (deadlock). Such properties are very important for the analysis of CPN. An execution of a CPN is described by means of an occurrence sequence. It specifies the markings that are reached and the steps that occur. In general, a step may consist of several enabled binding elements occurring concurrently. A binding element is a pair consisting of a transition and a binding of its variables. A finite occurrence sequence is an occurrence sequence consisting of a finite number of markings and steps. An infinite occurrence sequence is an occurrence sequence consisting of an infinite number of markings and steps. An infinite occurrence sequence corresponds to a non-terminating execution of the system. The basic idea behind a state space is to construct a graph which has a node for each reachable marking and an arc for each occurring binding element. State spaces are also called occurrence graphs or reachability graphs/trees. The first of these names reflects the fact that a state space contains all the possible occurrence sequences, while the two latter names

reflect that the state space contains all reachable markings.

THE PROPOSED DESIGN AND ITS ANALYSIS

For the latest technology in automation i.e., DASs, OMs guidelines are rarely dealt with. Some standards in this area such as IEC 61499-1 [8] have mentioned such terms. Yet those standards provide inadequate specific details. In IEC 61804, OM is defined as managerial function and some OMs are mentioned without sufficient details. In IEC 61499-1 the explanation of operation mode is too short and focused on the operation of software components (mode of a function block) Therefore, the guideline specified in this work is based on the ideas from GEMMA, S88 and PackML.

OM concept can be optionally put only in a system level or put in

both system and sub-system level. The second option seems to be a better solution for the DAS. A central command for all those OMs can still be built at system level, e.g., an *Estop* command in the system level could be linked to *Estop* command in all the sub-systems and stop all of them dramatically.

The Proposed Template Model for System and Sub-system

A template CPN model for a system level proposed in this research can be seen in Figure 1. In the system level, there is no logic control description, but only the high-level setting of the system. The OM later is defined in the sub-system level. However, an *Estop* command remains in the system level to abort the entire system process to respond an emergency condition.

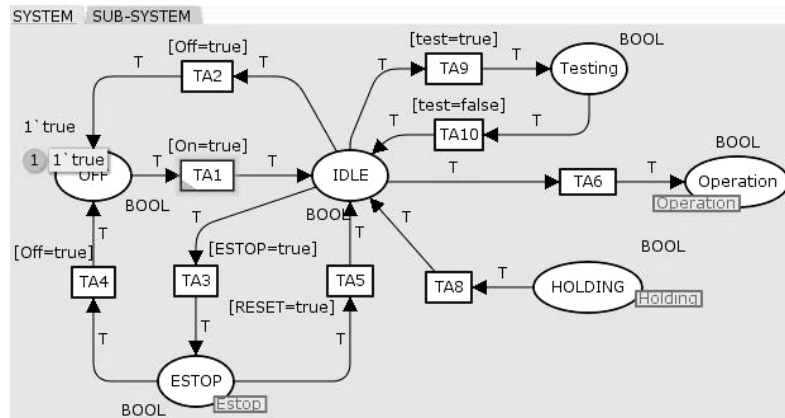


Figure 1. CPN model for Operation Modes based Design at System Level

For sub-system level, a proposed template model can be seen in Figure 2. The template give options to choose which state and command that are considered or unconsidered in the implementation according to the stake holder demands. From state *Standby*, there are three modes can be chosen, i.e.

automatic, *manual*, and *semi-automatic*.

Automatic pertains to the process or operation which runs automatically based on the control algorithm from one state to another when the respective conditions are met without intervention by an operator. However, the operation can be held or aborted via an emergency condition

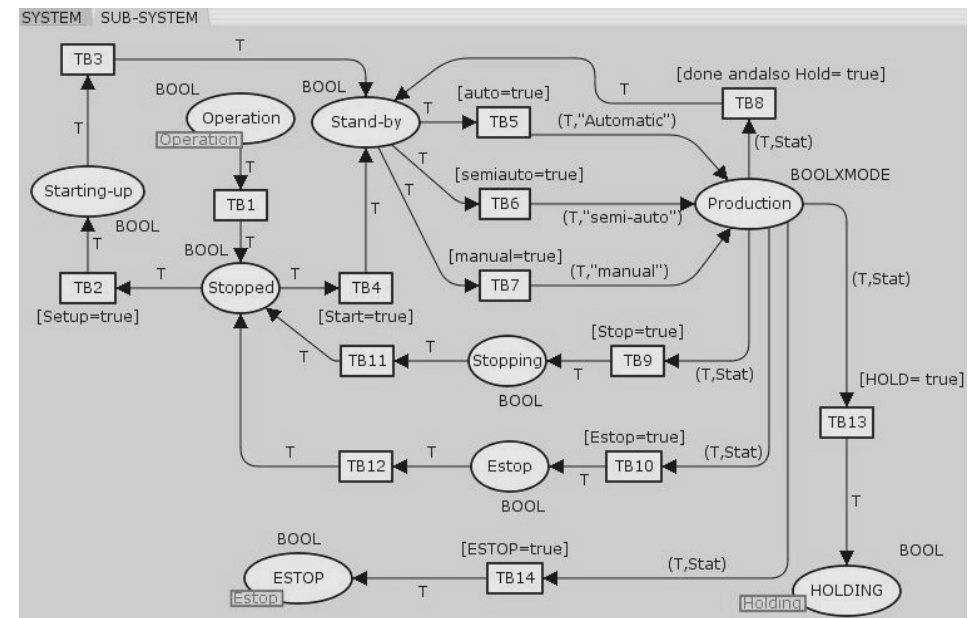


Figure 2. CPN model for Operation Modes based Design at Sub-system Level

Manual represents the processes operated by mechanical force, applied by personal intervention where the order is specified by an operator. **Semi automatic** is a combination of manual and automatic features. A manual command is required to enable the automatic

feature to execute a function or a part of a process. There are also *Estop*, *HOLD*, and *Stop* commands used in the model. Once the *Estop* push button is pushed, the process is stopped and cannot be restarted. It should not be creating a hazardous condition. The system must be reset

to the initial condition so the process starts from the beginning. While, pushing the *Hold* button immediately stops all operations. In this case, the previous process and the remaining tasks are possible to be restarted.

Analysis Result of the Template Model

In the manual and automatic simulation analysis, the models worked as expected. For performance and state space analysis, Figure 3 shows the state space behavior of the template model (Figure 1 and 2) that is used for as the analysis tool. Performance of the model shows that both template models only have 14 nodes, 32 arcs, no timed action (could

be valued in implementation), and all nodes have been considered (i.e. status is full). Besides, Strongly Connected Components (SCC) graph has only one node without arc because there is no arc that connects one component to the other. In Boundedness properties, all places have the upper integer bounds "1" and the lower integer bounds "0". The best upper multi-set bounds for all places are 1>true, while the best lower multi-set bounds are empty for all places. From the state space analysis, all places have home marking characteristic as expected. There is no dead marking and dead transition instance and all transition instances are live.

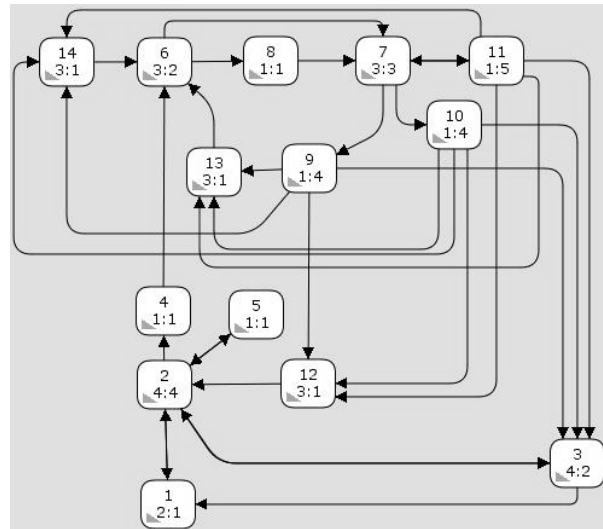


Figure 3. CPN model for Operation Modes based Design at Sub-system Level

CASE STUDY

An experimental case study presented here is a lab scale product selection control system that has one conveyor as a main transport for the whole selection process based on the size of product (i.e. height and width) and the material (i.e. metal or non-metal).

Before the operation modes design is implemented to the system, control panel had been built as an implementation tool to select the corresponding mode and to give a command either to system or sub-system. The control panel can be seen in Figure 4. The first row on the panel is mounted by indicators, from left to the right, i.e. indicator for *Start* command, *Setup* command, and *ON system status*. The second row is mounted by push buttons, i.e., *Start* and *Setup*, and *ON/OFF switch*. The third row shows the indicator for *Hold* and *Stop* commands, followed by their push button below them. The red push button is for an *Estop* command. The command signals from the push buttons on the panel will be connected to the PLC as a main controller via the provided output connectors at the main panel. To turn on/off indicators, the provided input connectors are connected to the PLC as well.



Figure 4. The built Main Panel for Modes Selection and Operation Commands.

The whole system can be seen in Figure 5. There are three main parts in this system, i.e., PLC as the main controller, main panel, and plant. In the experiment, Ladder Diagram is used as a programming technique. During the implementation, the OMs based design could run properly where the system considers three modes, i.e. *automatic*, *semi-automatic*, and *manual*, and the system considers some commands such as *Start*, *Setup*, *Hold*, and *Stop*. The OMs characteristics are quite complete compare to the usually installed in the industries in west-Kalimantan that were observed in our survey.

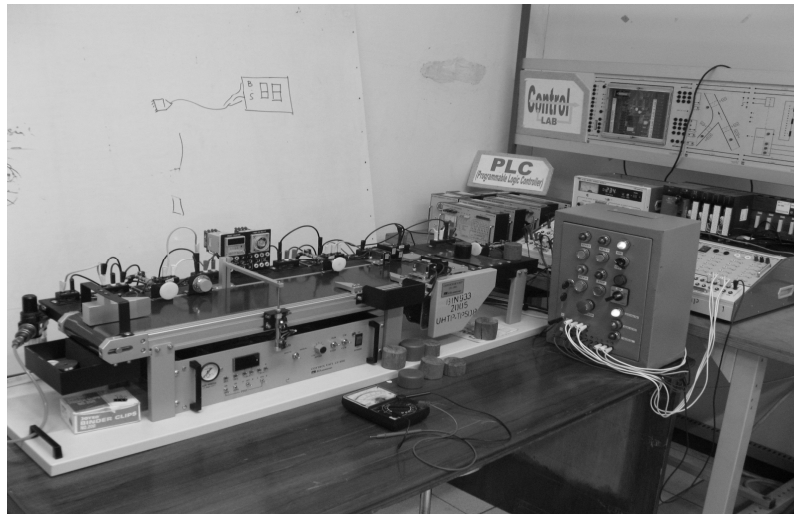
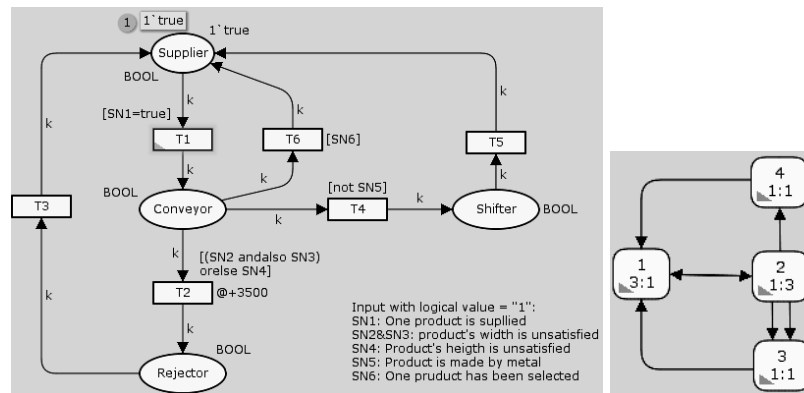
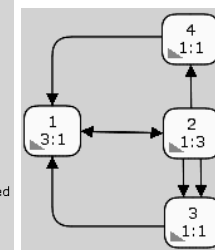


Figure 5. Production Control System based on Operation Modes Design using PLC



(a) Model CPN for Production proces



(b) State space model

Figure 6. Schedule of Mechatronic Functions at Product Selection System.

Figure 6(a) shows the execution place *production* of the design shown schedule of mechatronic functions in in Figure 2. It can be seen that

mechatornic components are shown as a place such as *Supplier (Move 2 points)*, *Conveyor (Move 1 point)*, *Rejector (Move 2 points)*, dan *Shifter (Move 1 point)*. If the system is interrupted either by command *Stop*, *Hold*, or *Estop* then the system will

leave production process and move to the particular place related to the given command. Figure 6(b) shows the state space model for the *Production* model. In the generated state space, there are four nodes and seven arcs as follows:

Statistics

State Space

Nodes: 4
 Arcs: 7
 Secs: 0
 Status: Full

Scc Graph

Nodes: 1
 Arcs: 0
 Secs: 0

Boundedness Properties

Best Integer Bounds

	Upper	Lower
Conveyor	1	0
Rejector	1	0
Shifter	1	0
Supplier	1	0

Best Upper Multi-set Bounds

Conveyor	1	1`true
Rejector	1	1`true
Shifter	1	1`true
Supplier	1	1`true

Best Lower Multi-set Bounds

Conveyor	1	empty
Rejector	1	empty
Shifter	1	empty
Supplier	1	empty

Home Properties

Home Markings

All

Liveness Properties

Dead Markings

None

Dead Transition Instances

None

Live Transition Instances

All

Fairness Properties

T1	1	Impartial
T2	1	Just
T3	1	Fair
T4	1	Just
T5	1	Fair
T6	1	Just

CONCLUSION

In this paper, an approach to handle operation modes (OMs) for automation systems has been elucidated. Design models using Colored Petri net (CPN) have been depicted to describe the logic behavior and analysis of some behavior properties regarding to the simulation, performance and state space. The OMs model is not meant to be implemented as a controller, but as scenarios to enhance the controllability of the system. Further research could be directed on the software development of the proposed guideline.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to thank DIKTI for providing the research funding in FUNDAMENTAL Project. I also thank to five companies in West Kalimantan, i.e. PT. Indofood Makmur Tbk, PT. Angkasa Pura, PT. Sumber Djantin, PT. Sumber Alam, and PT. Cahaya Kalbar, Tbk. for their support as respondents of the survey.

REFERENCES

- [1] Moreno, S. & Peulot, E. *Le GEMMA – Guide d'Etude des Modes de Marches et d'Arrêts*, Edualivre, Paris, 1997. (Book)
- [2] OMAC, *Packaging Machine Language V3.0 Mode & States*

Definition Document, OMAC Motion for Packaging Workgroup, 2006. (Book)

Parshall, J. & Lamb, L. *Applying S88: Batch Control from a User's Perspective*, ISA Press, 1999. (Book)

Panjaitan, S. & Frey, G. *Operation modes handling in distributed automation systems*, in Name of Proc. of the IFAC Workshop on Dependable Control of Discrete Systems, Paris-Cachan (France), pp. 241-246, 2007. (Conference Proceedings)

S. Panjaitan & G. Frey. *Development process for distributed automation systems combining UML and IEC 61499*, International Journal on Manufacturing Research, Vol. 2, No. 1, pp 1-20, Inderscience publisher, 2007. (Journal).

Jensen, K. *Coloured Petri Nets. Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use*. Vol. 1: Basic Concepts, EATCS Monographs on Theoretical Computer Science, Springer-Verlag, 1992. (Book)

Panjaitan, S. D. *Modular and Formal Design Approach of Industrial Automation using Coloured Petri Net*, Jurnal Elkha, ISSN: 1858-1463, pp. 1-8, 2008. (Journal)

IEC (International Electrotechnical Commission). *IEC 61499-1: function block – part 1: architecture*, IEC International Standard Press, 2005. (Book)

KAJIAN BANJIR SUNGAI SINGKAWANG

Danang Gunarto, Hari Wibowo dan Budiman Arpan

Staf Pengajar Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura Pontianak

ABSTRAK

Singkawang adalah kota terbesar kedua di Kalimantan Barat setelah Pontianak. Wilayah ini berada di bagian utara Kalimantan Barat dan berhadapan langsung dengan Laut Natuna. Penanganan banjir yang telah dilakukan pemerintah daerah dengan mengutamakan normalisasi sungai justru membuat daerah genangan baru. Penelitian ini mencoba mencari akar permasalahan banjir di Sungai Singkawang.

Untuk mensimulasikan fenomena pengaliran dan banjir Sungai Singkawang digunakan model aliran 1D. Data kemiringan dan penampang sungai diperoleh dari pengukuran lapangan. Data hujan didapatkan dari stasiun Singkawang. Kalibrasi model dilakukan dengan membandingkan data pengukuran kecepatan di lapangan dan simulasi model. Analisis banjir dilakukan dengan kala ulang 5 tahunan. Penentuan daerah genangan dilakukan dengan membandingkan elevasi bantaran sungai dengan elevasi banjir hasil simulasi model.

Debit banjir Sungai Singkawang untuk periode ulang 2 dan 5 tahunan masing-masing adalah 14,75 dan 17,75 m³/dtk. Kemiringan sungai daerah downstream 0,073%. Perbaikan dan normalisasi sungai yang sudah dilakukan pada daerah upstream dan sekitar muara justru menyebabkan penumpukan beban pada bagian tengah pengaliran Sungai Singkawang. Hambatan pengaliran terbesar terjadi pada daerah padat penduduk. Daerah genangan baru muncul akibat pengaturan sungai yang tidak komprehensif sehingga terjadi penumpukan air.

Kata kunci : Sungai Singkawang, banjir, hujan

PENDAHULUAN

Singkawang adalah kota terbesar kedua di Kalimantan Barat setelah Pontianak. Wilayah ini berada di bagian utara Kalimantan Barat dan berhadapan langsung dengan Laut Natuna. Saat ini banjir merupakan salah satu masalah utama yang dihadapi kota Singkawang. Pada

Desember 2008 dan Januari 2009, banjir telah menenggelamkan sebagian wilayah Kota Singkawang. Meskipun tidak menyebabkan korban jiwa, banjir menghentikan aktivitas sektor perekonomian. Gangguan kesehatan, pelayanan jasa publik seperti listrik dan air bersih terhenti.

Aktivitas pendidikan dan perkantoran tidak bisa berjalan normal.

Jika dirunut ke belakang, akar permasalahan drainase di perkotaan berawal dari penambahan penduduk baik secara alami maupun melalui urbanisasi (Suroso, 2006). Pertumbuhan penduduk yang tidak diimbangi dengan penyediaan sarana dan prasarana kota mengakibatkan pemanfaatan ruang yang kurang maksimal. Pembangunan prasarana kota menjadi kurang teratur dan lebih banyak terkesan tambal sulam. Pertumbuhan jumlah penduduk membawa konsekuensi pada kebutuhan ruang terbangun untuk pemukiman, industri dan usaha jasa lainnya. Eksplotasi lahan yang dilakukan akan berdampak pada peningkatan jumlah aliran limpasan sebagai akibat peningkatan ruang terbangun. Management kelebihan air diperlukan agar tidak mengganggu kenyamanan dan kualitas pemukiman masyarakat.

Prasarana drainase perkotaan, merupakan salah satu komponen yang sangat penting untuk dipelihara dan dikembangkan dalam strategi pembangunan lingkungan perkotaan secara kontinyu. Sasaran yang hendak dicapai dalam sektor ini adalah penanganan masalah banjir/genangan serta peningkatan kualitas limbah buangan.

Banjir yang terjadi di Sungai Singkawang merupakan masalah tahunan yang belum terselesaikan. Strategi pengendalian banjir yang telah diterapkan dengan mengedepankan normalisasi sungai belum membuahkan hasil. Banjir yang

terjadi pada bulan Desember 2008 dan Januari 2009 justru menunjukkan kegagalan strategi penanganan banjir Sungai Singkawang.

Masalah banjir berdampak sangat luas terhadap berbagai aspek kehidupan masyarakat. Oleh sebab itu upaya untuk mengatasinya harus merupakan bagian yang tak terpisahkan dari kegiatan pembangunan yang menyeluruh dalam rangka meningkatkan kesejahteraan masyarakat. Terkait dengan permasalahan banjir itu diperlukan penyempurnaan terhadap kebijakan, strategi dan upaya penanganan masalah banjir yang telah ada, baik yang menyangkut aspek-aspek teknis maupun non-teknis.

Tidak adanya masterplan pengendalian banjir yang komprehensif mengakibatkan penanganan Sungai Singkawang tidak terencana dengan baik. Salah satu contoh penanganan banjir yang tidak terencana dengan baik adalah normalisasi Sungai Singkawang yang dilakukan pada bagian hulu, sementara pada daerah hilir justru tidak dilakukan upaya perbaikan sungai. Hal ini telah mengakibatkan banjir akhir tahun 2008 dan awal 2009 menjadi lebih besar dibanding tahun-tahun sebelumnya.

TUJUAN

Kompleksitas permasalahan pengaliran Sungai Singkawang memerlukan management kelebihan air secara terpadu agar tidak menimbulkan genangan yang merugikan. Pengaturan kelebihan air

dapat dilakukan dengan mempertimbangkan daya dukung lingkungan untuk meminimalkan dampak banjir.

Penelitian ini direncanakan dalam dua tahap. Tujuan akhir yang hendak dicapai adalah kajian teknis penanganan masalah banjir dan genangan yang diakibatkan pengaliran Sungai Singkawang. Tujuan yang hendak dicapai pada tahap pertama ini adalah identifikasi penyebab banjir Sungai Singkawang Sedangkan tujuan pada tahap II adalah :

- a. Model pengendalian banjir sungai singkawang
- b. Jenis dan jumlah prasarana pengendali banjir
- c. Bahan ajar "Drainase Perkotaan" dengan memasukkan muatan lokal

Beberapa istilah, pengertian dan rumusan yang menyangkut banjir dan upaya untuk mengatasinya yang telah populer dan beredar luas di masyarakat maupun di lingkungan aparat pemerintah sampai saat ini masih banyak yang keliru. Kekeliruan, ketidak-seragaman dan keterbatasan pengertian masyarakat terhadap masalah ini menimbulkan dampak negatif terhadap upaya mengatasi masalah banjir, antara lain berupa kurangnya kepedulian dan peran masyarakat dalam mengatasi masalah banjir. Sebagian besar masyarakat beranggapan bahwa upaya mengatasi masalah banjir adalah merupakan kewenangan dan tanggung jawab pemerintah

sepenuhnya. Demikian pula adanya pemahaman yang keliru terhadap kinerja sistem pengendalian banjir (Siswoko, 2004).



Gambar 1. Banjir Singkawang
(sumber : <http://www.singkawang.us/modules>)

STUDI PUSTAKA

Sistem Drainase Kota Singkawang

Kerangka sistem jaringan drainase di BWK-A Kota Singkawang dibentuk dengan tujuh saluran drainase primer yang terdiri yang terbagi atas 3 kategori, yaitu :

1. Saluran drainase primer utama yang terdiri dari :
 - a. Sungai Bawang Berfungsi sebagai kanal lingkaran utara dengan panjang 6,2 km.

- b. Kanal Kulor – Selakau berfungsi sebagai kanal lingkaran timur dengan panjang 3,1 km
- c. Sungai Cabang Tiga dan terusnya berfungsi sebagai kanal lingkaran selatan dengan panjang 6,7 km
- Saluran drainase utama yang berfungsi untuk melayani kawasan pusat kota, yaitu Sungai Singkawang dengan panjang 9,1 km
 - Saluran drainase primer penunjang, yaitu :
 - Parit Batas selatan BWK-A
 - Parit Gang Tani II dan terusnya sepanjang 1,9 m dan juga berfungsi menunjang pengaliran pada sungai Cabang Tiga
 - Parit jalan Kelapa Dua dan terusnya sepanjang 2,9 km

Banjir

Banjir adalah suatu kejadian ketika suatu wilayah yang oleh sebab tertentu menjadi tergenang air. Menurut Sunjoto (2007) banjir disebabkan, yang pertama oleh sebab alami dan yang kedua oleh sebab artifisial atau ulah manusia.

a. Penyebab Alami Banjir

- Curah hujan tinggi
- Infiltrasi rendah
- Elevasi muka tanah rendah terhadap air laut
- Pasang Surut Laut

b. Artifisial

- Retarding basin* berkurang
- Debit aliran dari hulu meningkat
- Problema aliran

4). Gangguan di muara sungai

Menurut Kodoatie (2002), permasalahan banjir/genangan di perkotaan pada dasarnya disebabkan oleh beberapa hal pokok, yaitu :

- Kondisi alam setempat seperti curah hujan yang relatif tinggi, kondisi topografi yang rendah, dan luapan air sungai yang terpengaruh pasang surut air laut.
- Penataan sistem drainase yang belum terpadu sesuai dengan kondisi kota setempat serta sistem drainase yang ada tidak terpelihara sehingga tidak bekerja secara optimal.
- Kerusakan Daerah Aliran Sungai (DAS) secara langsung akan mengakibatkan fluktuasi debit yang dapat melebihi kapasitas sungai (sungai akan meluap).
- Tingkah laku manusia sering juga menjadi penyebab banjir/genangan, seperti kebiasaan membuang sampah langsung ke dalam saluran/sungai, membangun hunian di atas atau di tepi saluran/sungai, pembuatan bangunan jembatan dan gorong-gorong tanpa mempertimbangkan kapasitas saluran/sungai.

Penanganan Banjir

Untuk mengatasi masalah banjir dan genangan sampai saat ini masih bersifat represif dengan mengandalkan pembangunan fisik (struktur). Upaya struktural penanganan banjir dirancang untuk memodifikasi kondisi alamiah sungai sehingga membentuk suatu sistem

pengendali banjir (*in-stream*). Sedangkan upaya preventif berupa kegiatan non-struktur penerapannya masih terbatas.

Di beberapa negara upaya struktur telah dikombinasikan dengan upaya non-struktur (*off-stream*) sehingga membentuk sistem penanganan yang menyeluruh/komprehensif dan terpadu. Ada juga negara yang mulai meninggalkan upaya struktur dan lebih mengutamakan upaya non-struktur. Upaya struktur selalu mengandung keterbatasan atau tidak dapat membebaskan lahan dataran banjir terhadap kemungkinan tergenang banjir secara mutlak (Siswoko, 2004). Penanganan banjir dengan menggunakan pendekatan struktural berpotensi merubah stabilitas interaksi lingkungan sangat cepat (Wiseno, 2003).

Kegiatan non-struktur bertujuan untuk menghindarkan dan juga menekan besarnya masalah yang ditimbulkan oleh banjir, antara lain dengan cara mengatur pembudidayaan lahan di dataran banjir dan di DAS sedemikian rupa sehingga selaras dengan kondisi dan fenomena lingkungan/alam termasuk kemungkinan terjadinya banjir. Untuk itu maka sebagai pelaku utama dari kegiatan ini adalah masyarakat baik secara langsung maupun tidak langsung. Upaya non-struktur tersebut dapat berupa (Siswoko, 2004) :

- Konservasi tanah dan air.
- Pengelolaan dataran banjir (*flood plain management*)

- Penataan ruang dan rekayasa DAS
- Penanggulangan banjir (*flood-fighting*)
- Penerapan sistem prakiraan dan peringatan dini
- Flood proofing* yang
- Peran masyarakat
- Penetapan sempadan sungai
- Penyuluhan dan pendidikan masyarakat
- Penanggulangan kemiskinan (*poverty alleviation*).

Menurut Suharjo (2004), pengendalian banjir yang paling efektif untuk daerah perkotaan adalah dengan menekan tinggi hidrograf banjir. Penurunan tinggi hidrograf banjir dapat dilakukan dengan pengembangan tandon (*reservoir*) secara parsial yang dipasang pada setiap bagian lahan perumahan untuk menampung air hujan melalui talang bangunan rumah.

Model Matematis Aliran 1D DUFLOW

Aliran pada saluran yang dipengaruhi pasang surut adalah aliran berubah lambat laun (*unsteady flow*), dimana debit, kecepatan dan elevasi muka air berubah-ubah menurut waktu. Aliran berubah lambat laun (*unsteady flow*) dapat didekati dengan dua persamaan sekaligus, yaitu kontinuitas dan momentum. Persamaan kontinuitas yang dirumuskan sebagai :

$$B \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

dimana :

B = lebar atas penampang basah
 η = elevasi muka air terhadap bidang acuan
 Q = debit aliran
 q = aliran limpasan permukaan (overland flow)

Sedangkan persamaan momentum dirumuskan sebagai :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\beta \frac{Q^2}{A} \right] + gA \frac{\partial \eta}{\partial x} + g \frac{Q}{AC^2 R} = 0$$

dimana :

β = koefisien momentum
 A = luas penampang basah
 g = percepatan gravitasi
 R = jari-jari hidraulik aliran
 C = koefisien Chezy

METODE PENELITIAN

Pengumpulan Data

Data Sekunder

Data yang digunakan dalam analisis terdiri dari data sekunder dan data primer. Data sekunder yang diperlukan adalah :

- Data hujan
- Data klimatologi
- Data pasang surut muara Sungai Singkawang
- Peta tata guna lahan

Data-data sekunder tersebut dikumpulkan dari instansi-instansi teknis baik yang ada di Propinsi Kalimantan Barat maupun Kota Singkawang.

Data Primer

Data primer adalah data yang dikumpulkan dari pengamatan atau pengukuran di lapangan. Data-data primer yang diperlukan adalah :

- Kecepatan aliran sungai Singkawang
- Kemiringan Sungai Singkawang
- Penampang melintang Sungai Singkawang
- Elevasi bantaran Sungai Singkawang

Pengukuran kemiringan dan penampang melintang sungai dilakukan dengan menggunakan theodolit agar diperoleh kualitas data yang akurat. Pengukuran kemiringan dan penampang melintang dilakukan sepanjang Sungai Singkawang mulai dari muara sampai sepanjang 8,1 km beserta anak-anak sungainya seperti tercantum dalam RDTRK Singkawang untuk tahun I. Pada tahun II, pengukuran dilakukan sampai daerah upstream yang merupakan hutan sekunder dengan kerapatan sedang. Pengukuran elevasi bantaran juga dilakukan untuk menentukan daerah rawan genangan di sepanjang aliran sungai Singkawang.

Pengukuran kecepatan dilakukan dengan menggunakan *currentmeter*. Data kecepatan aliran Sungai Singkawang digunakan untuk kalibrasi model matematis yang dibangun agar sesuai dengan kondisi lapangan.

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan adalah :

- Studi pustaka
- Pengumpulan data
- Analisa data hujan
- Analisa data pasang surut

- Pembuatan model matematis aliran Sungai Singkawang
- Kalibrasi Model
- Pemetaan daerah rawan genangan
- Simulasi penanganan banjir
- Interpertasi Model
- Solusi Pengendalian Banjir

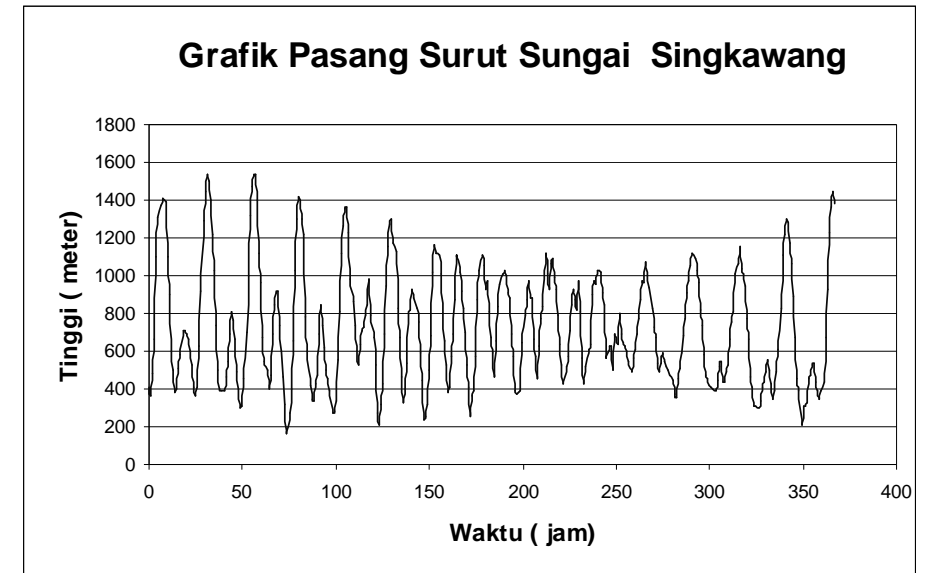
penerima. Pasang surut pada sistem drainase tersebut berpengaruh pada karakteristik, sifat dan jenis aliran. Karakter aliran yang terjadi selalu berubah terhadap waktu (*unsteady flow*).

Pasang surut di muara Sungai Singkawang termasuk dalam tipe campuran condong ke harian ganda (*mixed tide prevailing semidiurnal*). Dalam satu hari terjadi dua kali pasang dan dua kali air surut dengan tinggi dan periodenya, seperti terlihat dalam gambar 4.

ANALISIS DATA

Analisa Fluktuasi Muka Air

Sistem drainase makro Singkawang, sangat dipengaruhi oleh pasang surut Laut Natuna sebagai badan air



Gambar 4. Hasil Pengukuran pasang Surut di Muara Sungai Singkawang

Analisa Data Hidrologi

Hal-hal yang penting dalam perancangan drainase adalah distribusi curah hujan yang sifatnya berbeda-beda sesuai dengan jangka waktu yang ditinjau, yakni curah hujan

(jumlah hujan) dalam setahun, curah hujan bulanan, harian, jam-jaman ataupun curah hujan menit-menitan.

Cara yang dianggap paling baik untuk memperkirakan besarnya curah hujan dengan periode ulang tertentu dengan

melakukan analisa frekuensi pada tempat yang ditinjau. Data curah hujan merupakan suatu rangkaian data yang dianggap mempunyai bentuk persamaan atau fungsi probabilitas (*probability function*).

Analisa frekwensi curah hujan adalah analisis mengenai pengulangan curah hujan dimana suatu hujan dengan jangka waktu dan intensitas tertentu dianggap dapat terulang kejadiannya, untuk suatu perencanaan drainase umumnya dicari curah hujan rencana.

HASIL DAN PEMBAHASAN
Kondisi Fisik Sungai Singkawang

Sungai Singkawang adalah salah satu saluran utama dalam sistem drainase Kota Singkawang. Dalam penelitian ini, pengaliran Sungai Singkawang dibagi dalam 8 ruas, yaitu :

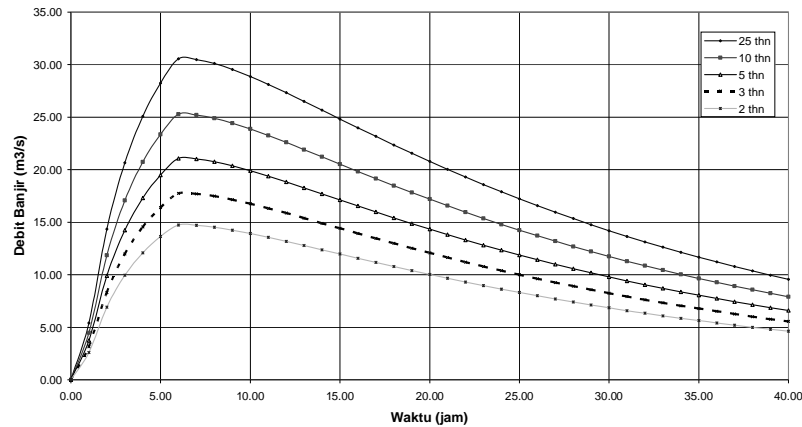
1. Ruas 1, Muara - Aliyang
2. Ruas 2, Aliyang – Jbt. Agen
3. Ruas 3, Jbt. Agen – Budi Utomo

4. Ruas 4, Budi Utomo – Pasar Ikan
 5. Ruas 5, Pasar Ikan – Pasar Daging
 6. Ruas 6, Pasar Daging – Pasar Baru
 7. Ruas 7, Pasar Baru - Jbt. Sama-Sama
 8. Ruas 8, Jbt. Sama-Sama – Hulu jembatan Sama-Sama
- Kondisi fisik masing-masing ruas diberikan pada tabel 1.

Kondisi Fisik Sungai Singkawang

Curah hujan yang digunakan sebagai dasar perhitungan adalah curah hujan maksimum untuk periode ulang 2, 3, 5 10 dan 25 tahun. Perhitungan debit banjir dilakukan dengan perhitungan hidrograf satuan sintetik. Besarnya debit banjir maksimum masing-masing adalah 14,75; 17,75; 21,08; 25,28 dan 30,6 m³/dtk. Hidrograf banjir hasil analisis selanjutnya disajikan pada gambar 5.

Hidrograf Banjir Sungai Singkawang



Gambar 5. Hidrograf Banjir Sungai Singkawang

Analisis Banjir Sungai Singkawang Elevasi Dasar Sungai dan Muka Tanah

Dari hasil pengukuran lapangan dan analisis pasang surut di muara Sungai Singkawang kondisi hidrotopografi dasar Sungai Singkawang dapat digambarkan sebagai seperti gambar 6. Berdasarkan model Green dkk. (2004) bahwa untuk pengelolaan banjir perkotaan terpadu diperlukan model koordinasi dalam

pengelolaannya, dimana koordinasi merupakan variabel utama dengan 5 (lima) sub variabel antara lain: 1) sub variabel pemeliharaan pengairan (*water resources*), bangunan pengendali erosi dan sampah perkotaan, 2) sub variabel struktur organisasi, 3) sub variabel alokasi dana dan *cost sharing*, 4) sub variabel implementasi *law enforcement* garis sempadan, dan 5) sub variabel pelibatan peran serta masyarakat.

Tabel 1. Kondisi Fisik Ruas Pengaliran Sungai Singkawang

Ruas	Panjang (m)	Kondisi Fisik	
Ruas 1	2.000	1. Lebar	: 25 – 70
		2. Dasar Saluran	: Dibawah Surut Terendah
		3. Kondisi Aliran	: Baik
		4. Bantaran	: Pelabuhan, Pemukiman, Pasar
Ruas 2	1.600	1. Lebar	: 19 - 25
		2. Dasar Saluran	: Antara Pasang - Surut
		3. Kondisi Aliran	: Baik
		4. Bantaran	: Pemukiman, Perkotaan
Ruas 3	700	1. Lebar	: 15 - 20
		2. Dasar Saluran	: Antara Pasang - Surut
		3. Kondisi Aliran	: Berkelok
		4. Bantaran	: Pemukiman, Ruko
Ruas 4	400	1. Lebar	: 15 - 20
		2. Dasar Saluran	: Antara Pasang - Surut
		3. Kondisi Aliran	: Berkelok, Tidak Teratur, Terganggu
		4. Bantaran	: Pemukiman, Ruko, Pasar
Ruas 5	280	1. Lebar	: 16 – 17
		2. Dasar Saluran	: Antara Pasang - Surut
		3. Kondisi Aliran	: Berkelok, Tidak Teratur, Sangat Terganggu
		4. Lahan Bantaran	: Pemukiman, Pasar
Ruas 6	740	1. Lebar	: 10 - 15
		2. Dasar Saluran	: Antara Pasang - Surut
		3. Kondisi Aliran	: Berkelok, Tidak Teratur, Sangat Terganggu
		4. Lahan Bantaran	: Pemukiman, Pasar
		1. Lebar	: 11 - 17
		2. Dasar Saluran	: Antara Pasang - Surut

Ruas 7	400	3. Kondisi Aliran	:	Berkelok, Tidak Teratur, Sangat Terganggu
		4. Lahan Bantaran	:	Pemukiman, Ruko
Ruas 8	-	1. Lebar	:	10 - 12
		2. Dasar Saluran	:	Pengaruh pasut kecil
		3. Kondisi Aliran	:	Baik
		4. Lahan Bantaran	:	Pemukiman, Ruko, Pasar

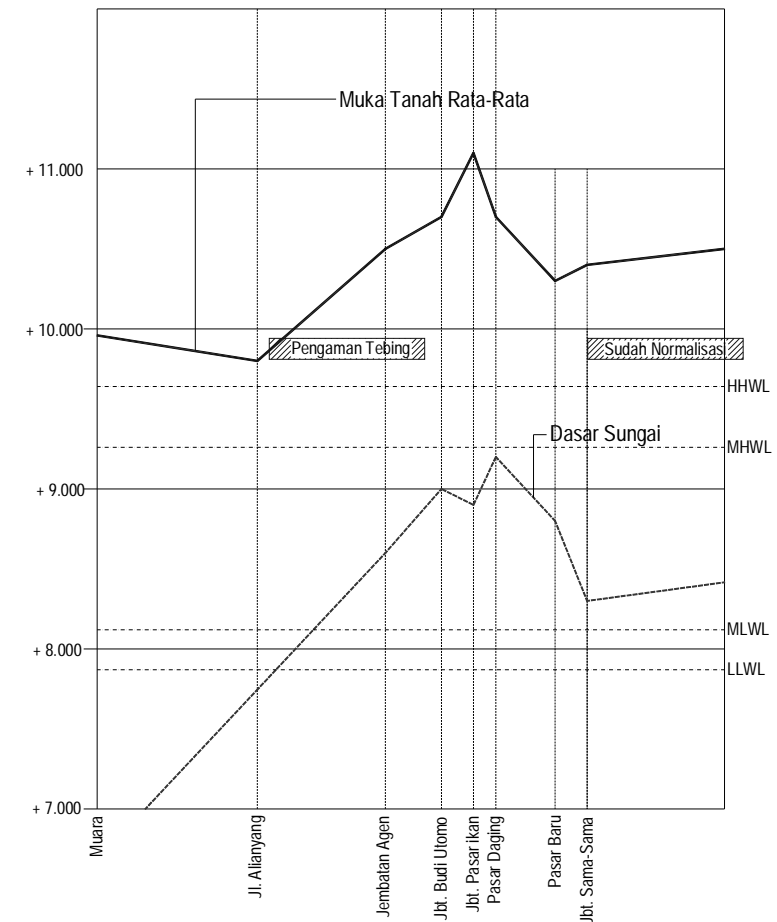
Sungai Singkawang adalah salah satu badan air penting di kota Singkawang. Dalam sistem drainase peranan Sungai Singkawang adalah sebagai saluran drainase primer utama. Pembangunan yang telah dilakukan pemerintah untuk menjaga kelestarian secara fisik yang dapat dilihat di lapangan adalah pembangunan penahan tebing dan normalisasi saluran.

Pembangunan penahan tebing telah dilakukan dengan struktur beton bertulang dan pasangan batu. Sedangkan normalisasi dilakukan untuk meningkatkan kapasitas hantar Sungai Singkawang. Dari gambar 6 dapat diamati adanya perubahan dasar Sungai Singkawang secara skematis pada jarak sampai kurang lebih 6 km dari muara. Peningkatan elevasi dasar Sungai Singkawang terjadi sampai pasar Turi. Setelah pasar Turi, elevasi dasar Sungai Singkawang mengalami penurunan. Akibat elevasi dasar saluran yang sangat tinggi di sekitar pasar Turi

terjadi hambatan aliran yang sangat besar. Pada saat terjadi banjir, efek pembendungan akibat perubahan elevasi sangat mempengaruhi daya hantar sungai.

Dari gambar 6 juga dapat dilihat bahwasanya, elevasi muka tanah rata-rata sepanjang kanan-kiri Sungai Singkawang masih lebih tinggi dibandingkan posisi pasang tertinggi. Daerah rawan genangan saat ini berada di hulu jembatan Sama-Sama. Perbedaan kemiringan antara daerah disekitar muara dan jembatan Sama-Sama seharusnya dapat menghasilkan kapasitas hantar yang memadai untuk mencegah banjir.

Pengaruh pasang surut terlihat sampai jauh ke dalam Sungai Singkawang. Pada saat pasang tinggi, pengaruh pasang masih sangat kuat sampai ke pasar maupun jembatan Sama-Sama. Namun pada kondisi pasang normal, pengaruh pasang surut hanya berpengaruh sampai pasar Turi.



Gambar 6. Elevasi Dasar Sungai Singkawang dan Muka Tanah Rata-Rata

Profil Muka Banjir

Untuk menggambarkan kondisi aliran eksisting di Sungai Singkawang dilakukan pemodelan matematis dengan menggunakan bantuan program komputer DUFLOW. Untuk menggambarkan kondisi aliran digunakan beberapa skema

perhitungan kondisi banjir dengan kala ulang yang berbeda.

Skenario pemodelan yang digunakan pada kondisi pengaliran eksisting dalam pemodelan ini adalah :

1. Kondisi pasang tinggi dan banjir 2 tahunan
2. Kondisi pasang tinggi dan banjir 5 tahunan

3. Kondisi pasang tinggi dan banjir 10 tahunan

Pada kondisi banjir dengan kala ulang 2 tahunan, profil muka air banjir sudah berada diatas lahan yang sangat potensial menimbulkan genangan. Potensi genangan daerah ini menjadi semakin tinggi dengan banjir yang lebih besar atau adanya hujan susulan sebelum air sempat mengalami resesi. Hal ini disebabkan :

1. Hambatan aliran antara jalan Alianyang sampai pasar Turi terlihat sangat tinggi.

Tingginya hambatan aliran disebabkan elevasi dasar saluran antara Alianyang dan pasar Turi yang lebih tinggi dibandingkan dengan bagian hulu. Normalisasi yang dilakukan pada hulu sungai Singkawang mengakibatkan penumpukan beban aliran di pasar Turi. Hal ini ditunjukkan dengan gradien hidrolis antara muara sampai Jalan Alianyang jauh lebih kecil dibandingkan ruas Alianyang – Pasar Baru. Demikian juga gradien hidrolis di hulu jembatan Sama-Sama yang terlihat lebih kecil dibandingkan ruas Alianyang – Pasar baru.

2. Jarak tempuh aliran

Lokasi penumpukan beban aliran berada di sekitar pasar Turi yang berjarak 4,5 – 5 km dari muara. Akibat jarak yang relatif panjang, beban aliran yang seharusnya dapat segera masuk ke muara memerlukan waktu yang lebih lama.

3. Dimensi saluran

Pada lokasi penumpukan beban aliran, dimensi saluran sudah

mengalami penyempitan sehingga mengurangi luas penampang basah saluran.

Permasalahan Drainase Sungai Singkawang

Sungai Singkawang adalah badan air utama sebagai pembuangan air yang melalui pusat kota Singkawang. Faktor – faktor yang berpengaruh secara teknis pada penataan Sungai Singkawang antara lain:

a. Kemiringan yang sangat kecil pada bagian hilir

Kemiringan lahan hanya 0,073 % dari muara sampai jarak 6 km dari muara. Elevasi lahan pada jarak tersebut hanya berada 85 cm diatas muka air pasang tertinggi. Kondisi ini mengakibatkan kemampuan *drain* sangat kecil dan rentan sedimentasi. Sementara dasar sungai Singkawang pada jarak tersebut masih berada di bawah muka air pasang.

b. Intensitas hujan tahunan yang tinggi.

Intensitas hujan tahunan daerah ini antara 2.500 hingga 3.500 mm dengan jumlah hari berhujan perbulannya bervariasi dari 9 hingga 23 hari. Intensitas hujan yang besar akan memberikan kontribusi pada debit banjir yang besar pula.

c. Implementasi dari penataan drainase yang belum komprehensif.

d. Pemanfaatan lahan di bantaran sungai yang sangat intensif di pusat perkotaan

e. Sedimentasi yang sangat tinggi

f. Pengaruh pasang surut muka air laut

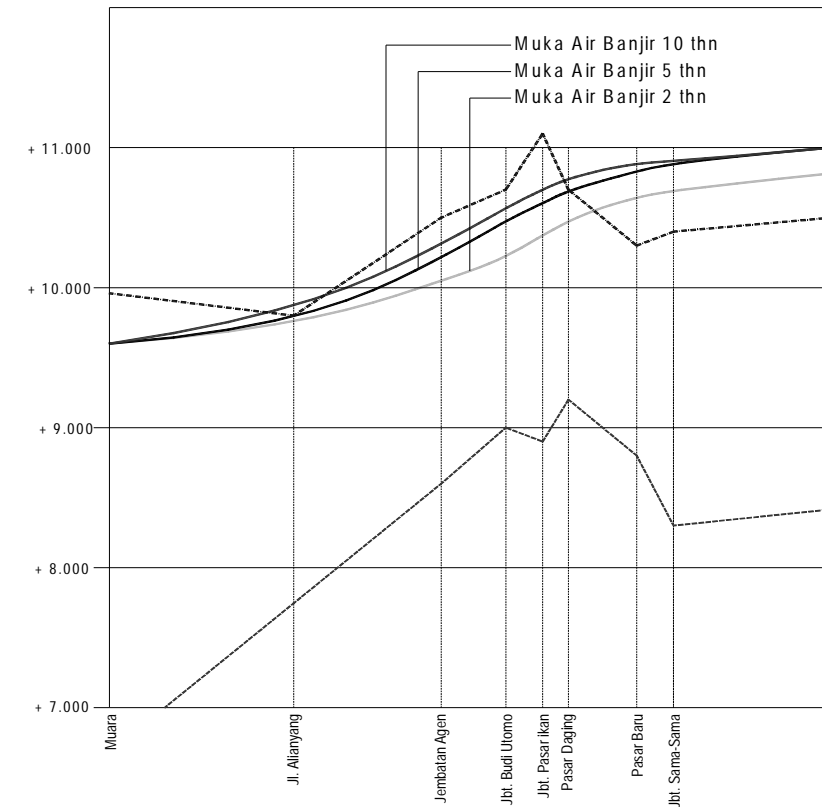
Pasang surut mengakibatkan efek *back water* pada saluran drainase kota, sehingga mengurangi kecepatan aliran dan daya hantar Sungai Singkawang

g. Budaya Sungai

Menurut Suparmono (2007), kegagalan bangsa Indonesia dalam memerangi kekeringan dan banjir, disebabkan oleh *belum adanya Budaya-Sungai yang dapat dijadikan anutan seluruh komponen Bangsa*. Meskipun sudah 62 tahun merdeka,

bangsa Indonesia *belum berhasil merumuskan kultur bangsa tentang Sungai*

Kebiasaan seperti membuang sampah dan limbah rumah tangga, pasar maupun industri langsung ke dalam saluran/sungai, hunian yang berada di atas atau di tepi saluran/sungai ataupun akibat pembuatan bangunan seperti jembatan dan gorong-gorong yang menyebabkan sempitnya alur saluran/sungai.



Gambar 7. Elevasi Muka Air Banjir

h. Normalisasi Sungai
Normalisasi sungai Singkawang dilakukan pada bagian hulu dan hilir sungai, sementara pada bagian tengah yang merupakan *bottle neck* pengaliran justru tidak dilakukan perbaikan. Normalisasi yang telah dilakukan justru memperparah banjir yang terjadi di bagian tengah pengaliran tersebut.

KESIMPULAN

- Dalam sistem drainase kota Singkawang, Sungai Singkawang merupakan saluran drainase primer utama
- Debit banjir maksimum untuk kala ulang 2, 5, 10 dan 25 tahun masing-masing 14,75; 17,75; 21,08; 25,28 dan 30,6 m³/dtk
- Hambatan pengaliran terbesar terjadi antara jembatan Agen – Pasar Turi
- Daerah rawan banjir terdapat pada daerah-daerah yang secara topografis berada di bawah muka air banjir sungai Singkawang. Daerah rawan genangan justru pada daerah pusat perekonomian dan pemukiman padat penduduk
- Permasalahan banjir di Sungai Singkawang disebabkan oleh :
 - Bagian hilir aliran Sungai Singkawang memiliki topografi yang relatif datar yaitu hanya 0,073%.
 - Intensitas hujan tahunan yang tinggi.
 - Intensitas hujan tahunan daerah ini antara 2.500 hingga 3.500 mm dengan

jumlah hari berhujan perbulannya bervariasi dari 9 hingga 23 hari. Intensitas hujan yang besar akan memberikan kontribusi pada debit banjir yang besar pula.

- Implementasi dari penataan drainase yang belum komprehensif
- Pemanfaatan lahan di bantaran sungai yang sangat intensif di pusat perkotaan sehingga mengurangi luas penampang saluran.
- Sedimentasi yang sangat tinggi
- Pengaruh pasang surut muka air laut Natuna dengan tunggang pasang surut mencapai lebih dari 2 meter.
- Tidak adanya budaya Sungai
- Normalisasi Sungai yang justru memperparah banjir

DAFTAR PUSTAKA

- , 2004, **Rencana Detail Tata Ruang Kota Singkawang 2005-2010**, Dinas Tata Kota dan Pertanahan Kota Singkawang
- Danang Gunarto, 2008, **Kajian Permasalahan Drainase Kota Singkawang**, Jurnal Teknik Sipil Vol 8 No. 1 Juni 2008
- Green, Colin, Johnson, Clare and Rowsell, Edmund Penning, 2004. **Integrated Flood Management : Concept Paper**. The Flood, Hazard

Research Centre (FHRC), University of Middlesex, U.K. It has been enriched through contributions and comments made by participants at the Session on Integrated Flood Management held during the Third World Water Forum in March 2003 in Kyoto, members of WMO's Commission for Hydrology (CHy) and other experts.

- Nur Yuwono, 1999, **Perencanaan Model Hidraulik**, Laboratorium Hidraulik dan Hidrologi, Pusat Antar Universitas, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
- Robert Kodoatie dan Sugiyanto, 2002, **Banjir**, Pustaka Pelajar, Yogyakarta
- Siswoko, 2004, **Banjir, Masalah Banjir dan Upaya Penanggulangannya**, Makalah Seminar Nasional Penanganan Banjir, ITS-Surabaya
- Suharjo, 2004, **Perilaku Banjir Pada Kota Padat Bangunan dan Pengendaliannya**, Makalah Seminar Nasional

Penanganan Banjir, Surabaya 29 September 2004

- Sunjoto, 2007, **Flood Management And Water Resources Conservation**, Makalah Seminar PIT HATHI XXIV pada 31 Agustus - 2 September 2007, Makassar
- Suparmono, 2007, **Budaya Sungai Mengendalikan Banjir dan Kekeringan**, Makalah Seminar PIT HATHI XXIV pada 31 Agustus - 2 September 2007, Makassar
- Suroso dan Hery A., 2006, **Pengaruh Perubahan Tata Guna Lahan Terhadap Debit Banjir Daerah Aliran Sungai Banjaran**, Jurnal Teknik Sipil, Vol 3 No 2 Juli 2006, Jurusan T. Sipil, Universitas Jendral Sudirman, Porwokerto
- Wiseno, Jayadi (2003), **Pendekatan Ekologi Pengendalian Banjir**, Jurnal dan Pengembangan Keairan, Badan Penerbit UNDIP No. 1 Tahun 8, ISSN: 0854-4549 (Jurnal Terakreditasi).

KONVERSI LIGNOSELULOSA DARI LIMBAH TANDAN KOSONG SAWIT UNTUK MENGHASILKAN BIOETANOL

CONVERSION OF LIGNOCELLULOSE FROM PALM OIL EMPTY FRUIT BUNCH WASTE INTO BIOETHANOL

¹⁾Berlian Sitorus, ²⁾Rizki Purnaini

¹⁾ Staf Pengajar Fakultas MIPA Jurusan Kimia Universitas Tanjungpura
e-mail: lian_205@yahoo.com; berlian.sitorus@gmail.com

²⁾ Staf Pengajar Fakultas Teknik Prodi Teknik Lingkungan Universitas Tanjungpura

ABSTRAK

Salah satu alternatif pengolahan limbah adalah dengan mengubahnya menjadi bahan yang bermanfaat seperti menjadi sumber energi yang terbarukan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkonversi limbah padat Tandan Kosong Sawit (TKS) menjadi bioetanol sebagai salah satu sumber energi alternatif. Sampel TKS didelignifikasi dengan larutan 1% NaOH selama dua jam pada suhu 100°C dengan variasi perbandingan antara berat TKS dengan volume larutan NaOH 1:25; 1:50;1:75 dan 1:100. Selanjutnya, sampel dihidrolisis dengan larutan H₂SO₄ pada suhu 80°C, dengan beberapa variasi konsentrasi asam yang digunakan yakni 5%, 15%, 30%, 40%, 50%, 60%, dan 70%. Larutan kemudian disaring dan dilakukan penetralan pH dengan larutan 2,5 M NaOH dan dianalisis kandungan glukosanya dengan metode Smogy-Nelson. Hasil uji menunjukkan bahwa komposisi yang paling baik untuk digunakan adalah yang memiliki perbandingan TKS:volume larutan NaOH 1%=1:25, dan konsentrasi asam H₂SO₄ = 5%. Dengan perbandingan ini didapat konsentrasi glukosa sebesar 335 ppm. Selanjutnya terhadap larutan yang menunjukkan kandungan glukosa tertinggi dilakukan fermentasi menggunakan *Saccharomyces Cereviceae* dengan tiga variasi perbandingan volume dan lima variasi waktu fermentasi yakni 24, 48, 72, 96 dan 120 jam. Dari hasil destilasi terhadap hasil fermentasi, diperoleh bahwa volume etanol terbesar, yakni sebesar 10,8 % diperoleh dari fermentasi selama 120 jam.

Kata kunci : bioetanol, tandan kosong sawit, delignifikasi, fermentasi

ABSTRACT

Converting wastes into valuable resources such as renewable energy sources is a reliable alternative in terms of waste treatment. The research objective was to convert empty fruit bunch wastes into bioethanol as an energy source. The waste was delignified using a 1% NaOH solution for two hours in 100°C with four different ratios of waste mass and the solution

which were 1:25; 1:50;1:75 and 1:100. After that, the delignified sample was hydrolyzed using H₂SO₄ solution with a temperature of 80°C, and seven different acid concentrations i.e. 5%, 15%, 30%, 40%, 50%, 60%, and 70%. The solutions were then filtrated and the pH was neutralized with NaOH solution of 2.5M and the glucose concentration was analyzed using Smogy-Nelson method. The results showed that the best composition was 1:25 (ratio waste:NaOH 1% solution), which was then hydrolyzed with H₂SO₄ of 5% concentration. By this condition, the glucose concentration was 335 ppm. Afterward, fermentation was performed by using *Saccharomyces Cereviceae* for the solution which had the highest glucose concentration with three different ratios of the solution and yeast. Finally, the fermentation was carried out in five different time variations which were 24, 48, 72, 96 and 120 hours. It was concluded that the highest bioethanol volume was reached during 120 hours fermentation with a 10.8 % of volume bioethanol produced.

Keywords : bioethanol, empty fruit bunch, delignification, fermentation

PENDAHULUAN

Salah satu permasalahan nasional yang sedang dihadapi dan harus dipecahkan pada saat ini adalah masalah energi. Indonesia sesungguhnya memiliki potensi sumber energi terbarukan dalam jumlah besar. Potensi yang benar-benar tidak dapat diabaikan adalah tersedianya lahan yang luas untuk membudidayakan tanaman-tanaman yang potensial sebagai sumber bahan baku bioenergi, misalnya kelapa sawit, ubi kayu, tebu, jagung dan lain-lain. Kalimantan Barat merupakan salah satu provinsi penghasil komoditi kelapa sawit. Menurut Pemerintah Provinsi Kalimantan Barat (2006), sampai dengan tahun 2004 luas areal penanaman kelapa sawit di Kalimantan Barat 367.619 Ha dengan komposisi tanaman muda (TBM) 94.808 Ha, tanaman menghasilkan (TM) 271.362 Ha dan tanaman tua/rusak (TT/TR) 1.449 Ha. Di masa

mendatang, Pemerintah Provinsi Kalimantan Barat telah merencanakan pengembangan perkebunan kelapa sawit seluas 1,5 juta hektar yang diarahkan untuk kawasan perbatasan (Ja'far, 2006).

Selain produksi minyak sawit mentah yang tinggi, produk samping atau limbah pabrik kelapa sawit juga tinggi. Limbah organik padat dari industri pengolahan kelapa sawit salah satunya berupa tandan kosong sawit (TKS). Pada tahun 2004, produksi tandan buah segar kelapa sawit diperkirakan mencapai 53,8 juta ton. Dari jumlah tersebut diperoleh limbah padat organik berupa TKS sebesar 12,4 juta ton. Tandan kosong merupakan limbah padat yang dihasilkan dari pabrik pengolahan kelapa sawit. Tandan kosong sawit yang tidak tertangani menyebabkan bau busuk dan menjadi tempat bersarangnya serangga lalat sehingga dianggap sebagai limbah

yang dapat mencemari lingkungan dan menyebarkan bibit penyakit. TKS dapat dijadikan sebagai bahan baku pembuatan bioetanol karena kandungan selulosanya. Kuantitas limbah tandan kosong sawit yang dihasilkan dari pengolahan 1 ton tandan buah segar sebanyak 230 kg atau sebesar 23%.

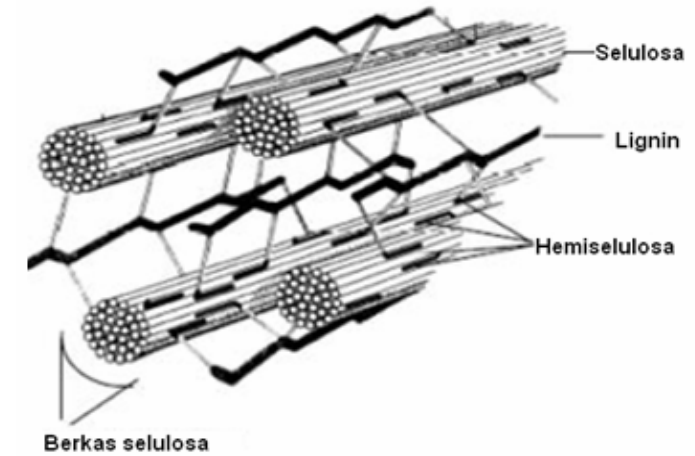
Selama ini limbah TKS telah dimanfaatkan sebagai sumber furfural, adsorben, bioplastik dan pupuk. Menurut Taherzadeh and Karimi (2007), serat dari TKS di antaranya mengandung hemiselulosa, holoselulosa, selulosa, arabinosa, xylosa, manosa, galaktosa dan glukosa dengan kandungan sekitar 1-82,4% untuk masing-masing senyawa.

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan sumber energi yang berkelanjutan, bioetanol yakni etanol yang dihasilkan dari biomassa merupakan suatu alternatif sumber energi yang menarik terutama untuk bahan bakar kendaraan bermotor. Berdasarkan gagasan bahwa bahan bakar bioetanol dapat memberikan kontribusi untuk lingkungan yang lebih bersih, maka kebutuhan akan keberadaan bahan bakar ini semakin meningkat. Proses produksi etanol yang efisien dan substrat yang murah

diperlukan. Proses-proses produksi etanol yang umum dilakukan menggunakan tanaman seperti tebu dan jangung saat ini sudah sangat dikenal, tetapi penggunaan substrat yang lebih murah seperti lignoselulosa dapat membuat bioetanol lebih mampu bersaing dengan bahan bakar yang berasal dari minyak bumi.

Lignoselulosa merupakan sumber yang dapat diperbaharui dan sangat berlimpah di muka bumi ini serta memiliki potensi yang baik sebagai substrat dalam proses fermentasi. Sedangkan hemiselulosa merupakan polisakarida kedua terbanyak di alam (Taherzadeh and Karimi, 2007).

Dinding sel tanaman merupakan sumber materi lignoselulosa, yang biasa diketahui sebagai biomassa, mempunyai struktur utama selulosa yang saling berinteraksi secara fisiko-kimia, polimer linear glukosa dengan hemiselulosa yang merupakan heteropolimer bercabang, dan lignin yang merupakan senyawa dengan massa molekul yang tinggi dan makromolekul aromatik (Himmel *et al.*, 2007; Howard *et al.*, 2003). Struktur dinding sel tanaman dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur dinding sel tanaman (BioCentrum-DTU, 2009)

Adapun proses dan penggunaan substrat yang mengandung lignoselulosa adalah kompleks, berbeda dalam beberapa aspek dibandingkan dengan produksi etanol yang berbahan dasar tanaman. Salah satu persyaratan penting adalah mikroorganisme yang efisien yang mampu melakukan fermentasi berbagai jenis gula (pentosa dan heksosa) dan juga kemampuannya bertahan terhadap kondisi tekanan. Permasalahan dalam penelitian ini adalah untuk mendapatkan metode terbaik/optimalisasi dalam hal praperlakuan, hidrolisis dan fermentasi untuk pengolahan limbah organik padat tandan kosong sawit menjadi bioetanol (Najafpour *et al.*, 2007). Hasil bioetanol yang diperoleh diharapkan dapat dijadikan sebagai sumber energi terbarukan dan sekaligus dapat membantu mengatasi

permasalahan lingkungan dalam hal pengolahan limbah padat organik.

BAHAN DAN METODE PENELITIAN

Bahan Penelitian

Bahan limbah padat yang digunakan merupakan TKS yang dihasilkan oleh industri-industri sawit yang terdapat di Kabupaten Kubu Raya-Kalimantan Barat. TKS tersebut diambil langsung dan dicacah hingga ukuran yang jauh lebih kecil. Potongan ini kemudian dicuci menggunakan aqua DM untuk menghilangkan pasir dan kotoran lainnya. Sampel yang telah dicuci dikeringkan dengan oven dengan suhu 80°C selama tiga hari berturut-turut, dan selanjutnya dihaluskan sampai ukuran 1-2 cm, dan diayak.

Selain TKS, diperlukan juga basa kuat, NaOH, untuk proses delignifikasi dan asam kuat, H₂SO₄ untuk proses hidrolisis. Ragi

Saccharomyces Cereviceae digunakan dalam tahap fermentasi untuk menghasilkan etanol. Untuk analisis gula dibutuhkan reagen Anthrone, reagen Nelson dan arsenomolibdat.

Peralatan Penelitian

Dalam penelitian ini digunakan peralatan pencacah untuk TKS, dan peralatan untuk proses fermentasi. Keduanya merupakan hasil desain dari tim peneliti. Selain itu digunakan juga peralatan-peralatan gelas yang umum digunakan seperti erlenmeyer, tabung reaksi dan peralatan gelas lainnya.

METODE PENELITIAN

Sampel yang telah diayak didelignifikasi melalui praperlakuan dengan larutan 1% NaOH selama dua jam pada suhu 100°C, dan dibuat variasi perbandingan antara berat sampel dengan volume larutan NaOH, yakni 1:25; 1:50 ; 1:75, dan 1:100. Selanjutnya sampel yang telah mengalami praperlakuan dicuci dan dikeringkan hingga beratnya konstan.

Terhadap sejumlah kecil sampel (2,5 – 10 g) ditambahkan larutan H₂SO₄ selama satu jam pada suhu 50°C. Perbandingan dari konsentrasi asam dengan sampel dibuat bervariasi (dengan variasi perbandingan konsentrasi H₂SO₄ yang digunakan, yakni 5%, 15%, 30%, 40%, 50%, 60%, dan 70%). Kemudian sampel dilarutkan dengan larutan H₂SO₄ encer dengan variasi konsentrasi H₂SO₄ dan dipanaskan pada suhu 80°C menggunakan water bath selama dua jam. Larutan

kemudian disaring dengan kertas saring Whatman dan dilakukan penetralan pH dengan larutan 2,5 M NaOH sebelum dianalisis kandungan glukosanya menggunakan Spektrofotometer UV/Vis.

Untuk penentuan kadar gula yang diperoleh, dibuat kurva standar gula total dengan cara melarutkan 0,2 g glukosa standar dalam 100 mL aquades sehingga diperoleh konsentrasi 2000 ppm. Larutan kemudian diencerkan dengan aquades sehingga diperoleh konsentrasi 0 (kontrol); 100; 200; 300; 400; 500 ppm. Masing-masing larutan tersebut kemudian ditambah dengan 5 mL pereaksi Anthrone, kemudian ditutup dan dicampur secara merata. Setelah ditempatkan dalam penangas air (*water bath*) 100°C selama 12 menit, dan didinginkan dengan air mengalir, kemudian dilakukan pembacaan absorbansinya pada panjang gelombang maksimum dan dibuat hubungan antara absorbansi dengan mg glukosa. Penetapan konsentrasi gula total yang terkandung dalam sampel dilakukan pada 1 mL sampel yang telah diencerkan dalam tabung reaksi dengan cara yang sama seperti pada pembuatan kurva estandar.

Fermentasi dilakukan secara *fed-batch* menggunakan *Saccharomyces cerevisiae*. *Saccharomyces cerevisiae* ditumbuhkan pada agar miring PDA dan diinkubasi selama 1 hari. Sebanyak 3 ose isolat khamir berumur 1 hari ditanam dalam 30 mL media PDB, kemudian diinkubasikan

pada suhu kamar dan diagitasi pada 120 rpm.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada pra-perlakuan, sampel TKS terlebih dahulu didelignifikasi menggunakan larutan NaOH 1 % dengan empat variasi perbandingan

komposisi antara jumlah sampel dengan volume larutan NaOH yakni 1:25, 1:50, 1:75 dan 1:100. Selanjutnya masing-masing hasil delignifikasi dihidrolisis menggunakan asam H₂SO₄ dengan variasi konsentrasi asam 5, 15, 30, 40, 50, 60 dan 70%.

Tabel 1. Hasil hidrolisis TKS dan konsentrasi glukosa yang dihasilkan

Komposisi pada pra-perlakuan		[H ₂ SO ₄] pada hidrolisis (%)	Konsentrasi glukosa (ppm)
TKS	NaOH		
1	25	5	335
		15	17
		30	21
1	50	5	184
		15	92
		30	132
1	75	5	93
		15	14
		30	58
1	100	5	214
		15	8
		30	37

Hasil dari pra-perlakuan perlakuan dan hidrolisis dengan menggunakan asam sulfat, H₂SO₄ pada berbagai variasi konsentrasi ditunjukkan pada Tabel 1. Hasil hidrolisis menggunakan konsentrasi H₂SO₄ 40, 50, 60 dan 70 % tidak ditunjukkan karena hasil hidrolisis dari masing-masing konsentrasi tersebut menghasilkan larutan berwarna hitam dan tidak dapat dianalisis lebih lanjut.

Dari penentuan kadar gula sesuai dengan Smogy-Nelson, hasil uji menunjukkan bahwa komposisi yang paling baik untuk digunakan

adalah yang memiliki perbandingan TKS:larutan NaOH 1% = 1 : 25, dengan konsentrasi larutan asam H₂SO₄ sebesar 5%. Dengan perbandingan ini didapat konsentrasi glukosa sebesar 335 ppm.

Larutan hasil hidrolisis dengan kadar glukosa tertinggi selanjutnya difermentasi dengan variasi perbandingan volume larutan hasil hidrolisis dengan volume *Saccharomyces Cereviceae* (media cair) = 1:1, 1:2 dan 1:3, selama selang waktu tertentu, yakni 24, 48, 72, 96, dan 120 jam. Setelah proses

fermentasi selesai, dilakukan destilasi untuk memisahkan etanol dari pelarut lain. Destilasi dilakukan pada rentang suhu 70-80 °C. Dari hasil fermentasi didapat bahwa fermentasi dengan waktu 24 dan 48 jam belum menghasilkan etanol.

Tabel 2. Hasil fermentasi terhadap larutan hasil hidrolisis dengan konsentrasi glukosa tertinggi

Waktu fermentasi (jam)	RasioVolume sampel:	
	<i>Saccharomyces</i>	Volume etanol (%)
72	1:1	6,7
	2:1	7,5
	3:1	6,7
96	1:1	7,5
	2:1	7,5
	3:1	8,3
120	1:1	10,8
	2:1	8,3
	3:1	8,3

Dari Tabel 2 terlihat bahwa kondisi fermentasi yang menghasilkan volume etanol tertinggi adalah dengan perbandingan 1:1 dan dalam waktu 120 jam.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa konversi limbah tandan kosong kelapa sawit (TKS) menjadi bioetanol dapat dilakukan melalui beberapa tahap yaitu: praperlakuan, delignifikasi, hidrolisis dan fermentasi. Komposisi terbaik untuk tahap delignifikasi adalah menggunakan perbandingan antara TKS: larutan NaOH 1% =1:25, dan yang dihidrolisis dengan asam H₂SO₄ dengan konsentrasi sebesar 5%. Dari hasil fermentasi yang telah dilakukan

selama beberapa variasi waktu (24 hingga 120 jam) didapatkan etanol dengan volume sejumlah 10,8 % dengan lama waktu fermentasi 120 jam.

Untuk mendapatkan hasil yang lebih baik kemungkinan diperlukan penelitian lebih lanjut dalam proses pengubahan bahan lain selain TKS (seperti bagas atau ampas tebu dan sekam padi) menjadi bioetanol, untuk dapat digunakan sebagai pembanding. Selain itu, untuk menghasilkan bioetanol dengan kadar yang tinggi, bahkan mencapai fuel grade, perlu dilakukan uji/analisis kelayakan etanol yang diperoleh sesuai dengan standar yang berlaku (SNI).

UCAPAN TERIMA KASIH

- Ditjen DIKTI-DP2M yang telah memberikan dana untuk melakukan penelitian ini melalui dana penelitian Hibah Kompetitif Penelitian sesuai prioritas Nasional Batch IV tahun 2009.

DAFTAR PUSTAKA

BioCentrum-DTU, 2009, *Ethanol potential for Empty Fruit Bunches pre-treated by Wet-Explosion*, Malaysian-Danish Environmental Cooperation Programme, Renewable Energy and Energy Efficiency Component Denmark's Technical University.

Himmel, ME., Ding, S.-Y., Johnson, DK., Adney, WS., Nimlos, MR., Brady, JW., Foust, TD., 2007. *Biomass recalcitrance: engineering plants and enzymes for biofuels production*. Science, 315: 804-807.

Howard, RL., Abotsi, E., Jansen van Rensburg, EL., Howard, S., 2003. *Lignocellulose biotechnology: issues of bioconversion and enzyme production*. African Journal of Biotechnology, 2: 602-619.

Ja'far, U., 2006. *Kebijakan pengembangan agribisnis kelapa sawit di Kalimantan Barat*.

Najafpour, G., A. Ideri, S. Salmanpou, and M. Norouzi., 2007. *Acid Hydrolysis of Pretreated Palm Oil Lignocellulosic Wastes*. IJE Transactions B: Applications, 20 (2): 147-156.

Taherzadeh, M. J and K. Karimi., 2007. *Enzyme-based hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials: a review*. BioResources, 2(4): 707-738.

STUDI HIDRODINAMIKA PERAIRAN ESTUARI SUNGAI KAPUAS KALIMANTAN BARAT

Muliadi¹⁾, Muh.Ishak Jumarang¹⁾, Nining Sari Ningsih²⁾, Safwan Hadi²⁾

¹⁾ Staf Pengajar Fakultas MIPA Program Studi Fisika Universitas Tanjungpura

²⁾ Staf Pengajar Program Studi Oseanografi ITB Bandung

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian untuk mengkaji pola sirkulasi arus perairan estuari sungai Kapuas yang dibangkitkan oleh pasang surut dan *discharge* sungai dan pola arus yang dibangkitkan oleh pasang surut, gaya pembangkit angin dan *discharge* sungai. Pada studi ini digunakan model numerik hidrodinamika menggunakan MIKE 21 yang dikembangkan oleh *DHI Water & Environment* untuk mensimulasikan pola sirkulasi arus. Simulasi dilakukan dengan dua skenario, yaitu skenario tanpa angin, hanya menggunakan pasang surut dan *discharge* sungai sebagai pembangkit arus, dan skenario dengan angin (pasut + *discharge* + angin). Pola sirkulasi arus hasil simulasi menunjukkan perubahan arah arus dan kecepatan pada kondisi pasut yang berbeda. Pada kondisi surut menuju pasang dan pasang tertinggi, massa air bergerak dari utara ke selatan hingga masuk ke badan sungai sedangkan pada kondisi pasang menuju surut dan surut terendah massa air bergerak ke arah yang berlawanan (dari selatan ke utara) dan air mengalir dari sungai ke luar menuju lepas pantai. Pola sirkulasi arus baik saat purnama maupun perbani menunjukkan kesesuaian pola dan yang membedakan adalah besarnya kecepatan arus.

Kata Kunci: Hidrodinamika, pola sirkulasi arus, pasang surut, Estuari sungai Kapuas

PENDAHULUAN

Sungai Kapuas merupakan sungai terpanjang di Indonesia dengan panjang total 1.143 km. Bagi masyarakat Kalimantan Barat, Sungai Kapuas menjadi urat nadi bagi kehidupan masyarakat yaitu sebagai sarana transportasi sungai, sumber irigasi, sumber perikanan dan sebagainya. Dewasa ini, terdapat berbagai masalah lingkungan yang dihadapi Sungai Kapuas antara lain masalah peningkatan endapan

lumpur, naiknya kadar garam musiman di sekitar muara, erosi, banjir, dan pendangkalan jalur perkapalan ke pelabuhan sungai.

Daerah di sekitar muara sungai merupakan daerah yang sangat kompleks karena terdiri dari interaksi beberapa proses yang saling berkaitan. Dengan demikian, wilayah tersebut memiliki peluang untuk mengalami perubahan (dalam skala ruang dan waktu) karena adanya pengaruh seperti sapuan arus,

hempasan ombak dan pasang surut laut (pasut). Interaksi antara aliran air dari Sungai Kapuas dan arus pasang surut yang masuk dari laut berpengaruh terhadap proses transpor sedimen baik yang berasal dari sungai, laut, maupun dari daratan di sekitarnya.

Pemahaman pentingnya pengelolaan daerah muara membutuhkan penanganan yang berkelanjutan (*sustainable*), salah satu aspek lingkungan yang penting untuk di ketahui agar pengelolaan sumberdaya dapat dilaksanakan dengan tepat adalah dengan memahami dinamika perairan. Dampak yang ditimbulkan oleh interaksi beberapa proses tersebut di dapat di atasi atau di cegah dengan mengetahui pola gerakan massa airnya. Model hidrodinamika akan digunakan untuk mensimulasikan pola sirkulasi arus. Gaya pembangkit (*generating forces*) arus yang akan digunakan adalah pasang surut (pasut), *discharge* sungai dan angin.

Tujuan Penelitian

Studi ini bertujuan untuk memodelkan dan mengkaji pola sirkulasi arus yang dibangkitkan oleh

pasang surut dan *discharge* sungai dan pola arus yang dibangkitkan oleh pasang surut, gaya pembangkit angin dan *discharge* sungai. Manfaat dari hasil penelitian diharapkan dapat digunakan sebagai input dalam perencanaan dan pengendalian lingkungan di sekitar daerah hilir Sungai Kapuas, sehingga pembangunan yang dilakukan merupakan pembangunan yang terencana dan berwawasan lingkungan.

METODOLOGI

Model Hidrodinamika

Pergerakan massa air (hidrodinamika) di suatu perairan dapat dipelajari dengan menggunakan hukum kekekalan massa (kontinuitas) dan kekekalan momentum. Pada studi ini digunakan model numerik hidrodinamika 2 dimensi menggunakan MIKE 21 yang dikembangkan oleh *DHI Water & Environment* untuk mensimulasikan pola sirkulasi arus. MIKE 21 menggunakan fleksibel mesh dan telah banyak diaplikasikan dalam bidang oseanografi, daerah coastal dan estuari.

Persamaan kontinuitas:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (1)$$

Persamaan momentum dalam arah x dan y:

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S \quad (2)$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \quad (3)$$

Dimana t menyatakan waktu; \bar{u} dan \bar{v} masing-masing menyatakan kecepatan arus dalam arah x dan y yang dirata-ratakan terhadap

kedalaman $h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz$ dan

$h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz$; η adalah elevasi muka

air laut; $h = \eta + d$ adalah kedalaman total perairan; $f = 2\Omega \sin \phi$

parameter Coriolis; g percepatan gravitasi bumi; ρ densitas air;

p_a tekanan atmosfer; S adalah magnitudo *discharge* sungai. T_{ij}

menyatakan gesekan viskos masing-masing

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x},$$

$$T_{xy} = A \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \text{ dan}$$

$$T_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}; \tau_{xx}, \tau_{xy}$$

adalah stress permukaan dalam arah x dan y dan

τ_{bx}, τ_{by} adalah stress dasar dalam arah x dan y .

Desain Simulasi

Daerah penelitian difokuskan di daerah hilir Sungai Kapuas, Propinsi Kalimantan Barat, dimana daerah model meliputi $1^\circ 9' \text{ LU} - 0^\circ 49' \text{ LS}$ dan $108^\circ - 109^\circ 40' 35'' \text{ BT}$, seperti yang terlihat pada Gambar 1. Data batimetri diperoleh dari peta batimetri Kalimantan - Pantai Barat, Dinas Hidro-Oseanografi tahun 2005. Daerah model didiskritisasi dengan jumlah elemen 10645 dengan ukuran grid bervariasi mulai 200 m di bagian sungai dan muara – muara Sungai

Kapuas hingga 25 km di perairan dalam (Gambar 2).

Simulasi dilakukan pada rentang 1 – 19 Januari 2009, dimana bulan tersebut mewakili musim barat. Domain model terdiri dari tiga batas terbuka, yaitu batas terbuka utara, barat dan selatan dan pada tiap titik di batas terbuka ini digunakan elevasi pasang surut yang diramalkan dengan *Tidal Model Driver* (TMD). *Discharge* sungai (hulu) diberikan data sintetik yaitu $1568,7 \text{ m}^3/\text{s}$, sedangkan data angin diperoleh dari NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) dan diberikan seragam untuk seluruh domain model tetapi bervariasi terhadap waktu. Nilai kecepatan angin dan arahnya selama simulasi diperlihatkan pada *windrose* pada Gambar 3. Koefisien gesekan dasar menggunakan koefisien Manning $32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ dan untuk suku turbulensi horizontal digunakan koefisien Smagorinsky dengan nilai konstanta 0,28.

Simulasi dilakukan dengan dua skenario, yaitu skenario tanpa angin, hanya menggunakan pasang surut dan *discharge* sungai sebagai pembangkit arus, dan skenario dengan angin (pasut + *discharge* + angin). Pada skenario pertama, dilakukan verifikasi elevasi hasil model dengan menggunakan ORI.96 (Matsumoto, dkk., 1996) dan untuk kecepatan arus hasil model diverifikasi dengan hasil prediksi *Tidal Model Driver* (TMD). Titik – titik verifikasi tersebut diperlihatkan Gambar 4. Pemilihan waktu cuplik

pasang surut mengacu pada titik A pada Gambar 4.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Verifikasi Elevasi Muka Air dan Arus

Elevasi muka air laut hasil model pada ketiga titik pengamatan secara umum menunjukkan kesesuaian yang cukup baik dengan hasil prediksi model pasut global ORI.96 baik fasa maupun amplitudonya (Gambar 5, 6 dan 7).

Pola sirkulasi arus hasil model di titik 1 cenderung lebih kecil dibandingkan dengan hasil model prediksi TMD (Gambar 8), sedangkan di titik 2 menunjukkan kesesuaian dengan hasil model prediksi TMD (Gambar 9). Sebaliknya, pada titik 3 pola arus lebih besar dibandingkan dengan hasil model prediksi TMD (Gambar 10).

Hasil Simulasi Pola Arus Pasang Surut

Setelah dilakukan verifikasi model, selanjutnya dilakukan simulai arus. Hasil simulasi arus merupakan nilai yang dirata-ratakan terhadap kedalaman (2D). Berdasarkan simulasi ini diperoleh informasi mengenai pola sirkulasi arus berdasarkan kondisi pasut yang terjadi.

Kondisi Pasut Purnama

a. Surut menuju pasang purnama

Elevasi muka air menunjukkan penurunan ke arah selatan. Di bagian utara daerah model, elevasi muka air berkisar 0,4

s.d 0,8 m dan di bagian selatan 0 s.d 0,2 m. Pada bagian sungai elevasi muka air berkisar -0,6 s.d 0 m. Perbedaan elevasi ini menyebabkan arus bergerak ke arah selatan hingga masuk ke sungai. Hasil simulasi menunjukkan pola arus bergerak dari utara menuju ke selatan dengan magnitudo kecepatan arus maksimum di bagian utara. Kecepatan mulai melambat di sekitar muara sungai Kapuas hingga di bagian selatan (Gambar 11a).

Pola sirkulasi arus yang dibangkitkan oleh pasut, angin dan *discharge* sungai menunjukkan arus bergerak ke arah selatan hingga memasuki badan sungai. Elevasi muka air di bagian utara berada pada kisaran 0,6 s.d 0,8 m dan di bagian tengah 0,2 s.d 0,6 m dan di bagian selatan 0 s.d 0,2 m, sementara di badan sungai elevasi muka air -0,6 s.d 0 m (Gambar 11b).

b. Pasang tertinggi purnama

Pada kondisi ini kondisi arus relatif mulai tenang dengan kecepatan yang sangat kecil ke arah selatan. Elevasi muka air berada di atas 1 m hampir merata di seluruh daerah model, kecuali di bagian utara dengan elevasi muka air 0,6 s.d 1 m (Gambar 12a).

Pola sirkulasi arus permukaan yang dibangkitkan oleh pasut, angin dan *discharge* sungai memperlihatkan arus bergerak ke arah selatan dengan kecepatan mulai melambat (kecil) dan hampir seragam di semua daerah model. Elevasi muka air semakin naik ke arah selatan dengan nilai elevasi di

bagian utara sekitar 0,6 m dan 1 m di bagian selatan (Gambar 12b).

c. Pasang menuju surut purnama

Elevasi muka air berkisar -0,4 s.d -0,2 m di bagian utara sedangkan di bagian selatan relatif lebih tinggi pada kisaran -0,2 s.d 0,2 m. Perbedaan elevasi ini menyebabkan arus berbalik ke arah utara. Hasil simulasi menunjukkan arus bergerak ke arah utara dengan magnitudo kecepatan hampir merata di seluruh daerah model (Gambar 13a).

Pola sirkulasi arus yang dibangkitkan oleh pasut, angin dan *discharge* sungai menunjukkan arus bergerak ke arah utara dengan kecepatan membesar ke arah utara. Elevasi muka air di bagian utara berada pada kisaran -0,6 s.d -0,4 m dan di bagian tengah -0,4 s.d -0,2 m dan di bagian selatan -0,2 s.d 0 m (Gambar 13b).

d. Surut terendah purnama

Pada keadaan surut terendah elevasi muka air berada pada kisaran -0,4 s.d -0,2 m sedangkan elevasi muka air di sungai -0,2 s.d 1 m. Arus bergerak ke arah utara dengan kecepatan arus maksimum di bagian utara. (Gambar 14a).

Pola sirkulasi arus yang dibangkitkan oleh pasut, angin dan *discharge* sungai menunjukkan arus bergerak ke arah utara dengan kecepatan sangat kecil (relatif tenang). Elevasi muka air menunjukkan penurunan ke arah selatan dimana elevasi di bagian utara berkisar -0,2 s.d 0 meter dan di

bagian selatan -0,8 s.d 0,6 m (Gambar 14b).

Kondisi Pasut Perbani

a. Surut menuju pasang perbani

Elevasi permukaan lebih tinggi dibagian utara dengan kisaran 0,2 s.d 0,4 m, bagian tengah 0 s.d 0,2 m dan di bagian selatan berada pada kisaran -0,2 s.d 0 m. Arus bergerak ke arah selatan dengan kecepatan yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan kondisi menuju pasang purnama. Kecepatan arus di sekitar garis pantai dan bagian selatan daerah model sangat kecil (Gambar 15).

b. Pasang tertinggi perbani

Elevasi muka air merata di seluruh daerah model pada kisaran 0,2 s.d 0,4 m. Pada kondisi ini arus tetap bergerak ke arah selatan dengan kecepatan yang relatif kecil. Kondisi arus tenang (kecepatan sangat kecil) terjadi di sekitar muara sungai Kapuas (Gambar 16).

c. Pasang menuju surut perbani

Elevasi muka air menunjukkan di bagian utara lebih rendah daripada di bagian selatan. Di bagian utara elevasi berkisar -0,4 s.d 0 m sedangkan di bagian selatan relatif lebih tinggi pada kisaran 0 s.d 0,2 m. Perbedaan elevasi ini menyebabkan arus berbalik ke arah utara. Hasil simulasi menunjukkan arus bergerak ke arah utara dengan magnitudo kecepatan maksimum di bagian utara (Gambar 17).

d. Surut terendah perbani

Pada keadaan surut terendah, elevasi muka air

menunjukkan penurunan ke arah selatan. Di bagian utara elevasi muka air berkisar -0,2 s.d 0,2 m sedangkan elevasi muka air di bagian selatan berkisar -0,4 s.d -0,2 m. Di sungai, elevasi muka air berkisar -0,2 s.d 0,4 m. Pada keadaan ini, kondisi arus relatif tenang (kecepatan sangat kecil) kecuali di bagian utara yang bergerak ke arah utara (Gambar 18).

KESIMPULAN

Pola sirkulasi arus hasil simulasi menunjukkan perubahan arah arus dan kecepatan pada kondisi pasut yang berbeda. Pada kondisi surut menuju pasang dan pasang tertinggi, massa air bergerak dari utara ke selatan hingga masuk ke badan sungai sedangkan pada kondisi pasang menuju surut dan surut terendah massa air bergerak ke arah yang berlawanan (dari selatan ke utara) dan air mengalir dari sungai ke luar menuju lepas pantai. Pola sirkulasi arus baik saat purnama maupun perbani menunjukkan kesesuaian pola dan yang membedakan adalah besarnya kecepatan arus.

Pada kondisi air surut menuju pasang purnama kecepatan arus masuk ke sungai berkisar 0,3 s.d 0,5 m/s, sedangkan pada kondisi pasut perbani kecepatan arus berkisar 0 s.d 0,25 m/s. Pada kondisi pasang tertinggi purnama kecepatan arus masuk ke sungai 0,25 s.d di atas 0,5 m/s sedangkan pada kondisi perbani kecepatan arus 0 s.d 0,25 m/s.

Pada kondisi pasang menuju surut purnama, kecepatan arus keluar dari sungai berkisar 0,2 s.d di atas 0,5

m/s sedangkan pada kondisi perbani kecepatan arus 0,2 s.d 0,45 m/s. Pada kondisi surut terendah purnama kecepatan arus keluar sungai 0,3 s.d di atas 0,5 m/s dan pada saat perbani kecepatan arus 0,3 s.d 0,5 m/s.

Pola sirkulasi arus yang dibangkitkan oleh pasut dan *discharge* sungai dan arus yang dibangkitkan oleh pasut, *discharge* sungai dan angin tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Dahuri, R., Rais, J., Ginting, S.P., dan Sitepu, M.J., "Pengelolaan Sumber Daya Wilayah Pesisir dan lautan Secara Terpadu", PT. Pradnya Paramita, 1996.
2. Ditjen Pembangunan Daerah, Depdagri, "Pedoman Perencanaan dan Pengelolaan Pesisir Terpadu", 1998.
3. Hadi, S., N. S. Ningsih, A. Tarya, Study in sesional Variation of Cohesive Suspended Sediment Transport in Estuari of Mahakam Delta by Using a Numerical Model, Jurnal Teknik Sipil, Vol. 13, No. 1, Januari 2006
4. Hutabarat dan Evans, 1984, Pengantar Oseanografi, UI Press, Jakarta.
5. Jumarang, M. I., Muliadi, Ihwan, A., 2008, "Pola sirkulasi Arus Tiga Dimensi Perairan Pantai Kalimantan Barat, *Journal Aplikasi Fisika FMIPA Haluoleo University*, Vol. 4 No.1, hal. 1-9
6. Ningsih, N. S., B. Priyono, S. Hadi, dan A. Tarya, "Studi Awal Pemodelan Numerik Transpor Sedimen 2D Horizontal di Estuari Mahakam, Jurnal Teknologi Mineral, Vol. XIV, No.2, 2007
7. Nontji, 1987, Laut Nusantara, Penerbit Djembatan. Jakarta
8. Pathirana, K. P. P., Yu, C. S., and Berlamont, J., "Modelling Cohesive Sediment Transport in Tidal Waters", Hydro-Port 94, International Conference on Hydro-Technical Engineering for Port and Harbor Construction. Yokosuka, Japan, October 19-21, 1994.
9. Simpson, J.H., "Physical Processes in the ROFI Regime", Journal of Marine Systems 12, 1997.
10. Supriharyono, "Pelestarian dan Pengelolaan Sumber Daya Alam di Wilayah Pesisir Tropis", PT. Gramedia Pustaka Utama, 2000.
11. Uncles, R. J., and Stephens, J. A., "Sediment Transport in the Humber-Ouse Estuary, UK, during May 1994", Physics of Estuary and Coastal Seas, Dronkers & Scheffers (eds) Balkema, Rotterdam, 1998.

KARAKTERISASI ADSORPSI ION Cu (II) DAN Cd(II) PADA SURFACE MOLECULAR-IMPRINTED BIOSORBENT

Anis Shofiyani, Titin Anita Zaharah, Endah Sayekti

Staf Pengajar Fakultas MIPA Jurusan Kimia FMIPA Universitas Tanjungpura

ABSTRAK

A new Surface-Molecular Imprinted Biosorbent (SMIB), which can considerably enhance the adsorption capacity of Cu(II) and Cd(II) ions is presented in this paper. The biosorbent was prepared by coating Cu(II) or Cd(II)-imprinted chitosan hydrogel onto *Chlorella* sp biomass surface followed by crosslinking procedure. Then, the imprinted ions were desorbed using EDTA solution to provide a specific template for Cu(II) and Cd(II) binding sites.

Batch adsorption was conducted to study the characteristics adsorption of Cu(II) and Cd(II) onto SMIB and non-Surface Molecular Imprinted Biosorbent (non SMIB) as comparison. By Langmuir isotherm analysis, chemisorption considered as predominant mechanism for the Cu(II) and Cd(II) adsorption onto SMIB as well as non-SMIB with maximum capacity (a_m) of 53,5198 mg/g and 47,3933 mg/g for Cu(II) and Cd(II), respectively.

Kata kunci : Surface Molecular Imprinted Biosorbent, Adsorpsi, Cu(II), Cd(II), chitosan

PENDAHULUAN

Logam berat merupakan jenis pencemar yang sangat berbahaya dalam sistem lingkungan hidup karena bersifat *unbiodegradable*, toksik, serta bioakumulatif dalam rantai makanan. Pada konsentrasi tertentu, logam berat masuk dalam lingkungan perairan sebagai produk samping atau terikut dalam limbah industri pertambangan, industri logam, baja, pemurnian, elektroplating, industri zat warna dan penyamakan kulit, tekstil, bahan-bahan elektronik, limbah pertanian dan limbah domestik. Metode konvensional untuk rekoveri logam berat dari limbah cair dilakukan antara

lain melalui kopresipitasi, pertukaran ion, elektrolisis, adsorpsi pada karbon aktif, dan lain-lain. Metode-metode ini umumnya rumit atau memerlukan pelarut organik dalam jumlah besar, beberapa diantaranya berbahaya untuk kesehatan dan menyebabkan masalah lingkungan. Ekstraksi Fasa padat (*Solid Phase Extracion=SPE*) dikembangkan dalam prekonsentrasi ion logam untuk mengatasi keterbatasan tersebut. Pemanfaatan SPE didasarkan pada: (Chang *et al*, 2007) ketiadaan emulsi, keselamatan, minimalisasi penggunaan reagen kimia, fleksibilitas, dan kemudahan dalam otomatisasi. SPE lebih cepat, sederhana, serta ramah secara

ekonomis dan lingkungan (Ersoz, 2004).

Permasalahan utama pada SPE adalah selektivitas dari mekanisme retensi material fasa padat yang rendah. Untuk meningkatkan selektivitas sorben, dikenalkan *Molecular-Imprinted Polymer* (MIP) (Tan *et al.*, 2001; Guo *et al.*, 2005; Ersoz, 2004; Ren *et al.*, 2008). Imprinting molekular ionik merupakan metode preparasi material sorben menggunakan templat kompleks logam untuk membuat konfigurasi spasial yang spesifik sesuai jenis ion logam templat yang digunakan. Setelah ion logam dilepaskan, polimerik sintetik tersebut akan bersifat lebih selektif dalam mengikat logam target sehingga MIP sangat efektif untuk pemisahan ion logam.

Chitosan (CS) dan turunannya merupakan jenis polimer yang banyak dikembangkan sebagai adsorben. Keutamaan chitosan terletak pada gugus $-NH_2$ dan $-OH$ yang dapat bertindak sebagai situs pengkhelat ion logam. Pemanfaatan CS dan *crosslinked-CS* sebagai adsorben logam berat telah banyak dilakukan (Ngah dan Liang, 1999; Gao, 2000; Guibal, 2004; Li dan Bai, 2006; Rinaudo, 2006). Proses *crosslinking* mampu meningkatkan kekuatan mekanis CS namun kapasitas adsorpsi berkurang karena sebagian besar gugus $-NH_2$ telah digunakan untuk bereaksi dengan agen *crosslinking*. Tan (2001) membuat *imprinted-CS* untuk mengatasi kelemahan tersebut. *Imprinted-CS* mampu meningkatkan

kapasitas adsorpsi ion logam namun tidak menguntungkan secara kinetika karena adanya hambatan difusi massa ion logam ke dalam struktur pori adsorben. Untuk mengatasi kelemahan tersebut pada penelitian ini dibuat *Surface-Molecular Imprinted Biosorben* (SMIB) dari bahan chitosan dan biomassa mikroalga *Chlorella*.

TUJUAN

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari karakteristik serta selektivitas adsorpsi ion logam Cu(II) dan Cd(II) pada SMIB hasil sintesis.

METODOLOGI

Bahan :

Semua bahan kimia yang digunakan mempunyai kemurnian dengan derajat p.a meliputi Chitosan (sigma DD>85%): $CuCl_2 \cdot 5H_2O$, $CdCl_2 \cdot H_2O$, CH_3COOH , H_2EDTA , $NaOH$.

Alat :

Spektrofotometr Serapan Atom tipe Hitachi Z-8000, FT-IR Shimadzu, pH-meter tipe KX 701 Lutron, *shaker*, dan serangkaian alat sorpsi

Jalan Penelitian :

Preparasi non-SMIB. CS *flake* dilarutkan dalam asam asetat dengan konsentrasi 2,5% (v/v), diaduk dan dihilangkan gelembung-gelembung yang terbentuk dalam vakum. Larutan dididamkan selama semalam, kemudian ditambahkan 0,5 g biomassa dan diaduk selama 60 menit. Non-SMIB yang dihasilkan disaring dan dicuci sampai netral. Selanjutnya dilakukan *dicrosslinking* menggunakan glutaraldehid selama

24 jam. Setelah disaring, dicuci sampai netral, dikeringkan pada temperatur $60^\circ C$, digerus dan diayak ukuran 80 mesh.

Preparasi SMIB. Dibuat masing-masing larutan logam berat Cd(II) dan Cu(II) dengan konsentrasi 2,0 M di dalam 50 mL pelarut asam asetat. Sejumlah 2,0 g chitosan dilarutkan ke dalam 50 mL larutan logam tersebut kemudian ditambahkan biomassa kering dan diaduk selama 60 menit. Biosorben yang dihasilkan kemudian dicetak, disaring dan dicuci sampai netral. Selanjutnya SMIB *dicrosslinking* menggunakan glutaraldehid selama 24 jam.

Ion logam yang terikat pada kompleks CS-biomassa didesorpsi menggunakan larutan EDTA hingga semua logam terlepas dari biosorben, kemudian dilakukan regenerasi menggunakan larutan NaOH selama 2 jam. SMIB yang dihasilkan disaring, dicuci sampai netral, dikeringkan pada temperatur $60^\circ C$, digerus dan diayak ukuran 80 mesh.

Karakterisasi SMIB dan non-SMIB dilakukan dengan cara menentukan luas muka spesifik, struktur permukaan serta keberadaan ion logam pada biosorben dikaji berdasarkan SEM dan FT-IR.

Karakterisasi Biosorpsi logam Cd(II) dan Cu(II) pada SMIB dan non-SMIB.

Kajian biosorpsi dilakukan dengan metode *batch* pada logam berat analit. Biosorpsi menggunakan 2 jenis biosorben yakni biosorben SMIB dan non-SMIB. Penentuan konsentrasi ion logam sebelum dan

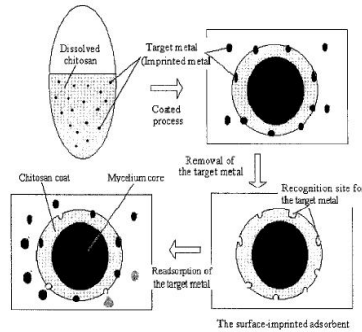
sesudah adsorpsi ditentukan berdasarkan hasil spektrofotometri AAS.

Penentuan isotherm adsorpsi : sebanyak 0,1 gram masing-masing adsorben SMIB dan non-SMIB dikontakkan dengan 10 mL larutan Cu(II) dan Cd(II) pada pH optimum selama 120 menit. Konsentrasi larutan ion logam divariasi pada kisaran konsentrasi 10-1500 mg/L. Selanjutnya adsorben dipisahkan dengan cara penyaringan dan sisa logam dalam larutan diukur menggunakan spektrofotometer serapan atom. Penentuan kapasitas adsorpsi dilakukan menggunakan model isotherm adsorpsi Langmuir (Oscik, 1982).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Imprinting molekular merupakan suatu teknik untuk menyiapkan situs aktif yang dapat dikenali secara spesifik oleh adsorbat yang dikehendaki. Teknik imprinting secara konsep merupakan metode yang relatif sederhana dan dapat diaplikasikan untuk tujuan target molekul yang sangat luas. Teknik imprinting molekular melibatkan pembentukan kompleks antara imprinting molekul dan gugus fungsional biosorben yang dimungkinkan terjadi melalui tiga jenis interaksi yakni : (1) kovalensi, (2) non-kovalensi dan (3) koordinasi ion logam (Guo *et al.*, 2005). Pelepasan imprinting molekul dari jejaring polimer meninggalkan situs pengikatan yang dapat digunakan untuk mengikat kembali jenis molekul yang sama secara selektif. Secara

ringkas, proses imprinting pada chitosan dengan menggunakan *surface material* biomassa alga disajikan melalui ilustrasi berikut.



Gambar 1. Skema teknik imprinting ion pada permukaan biosorben (Su et al., 2003)

Proses imprinting ion pada pembuatan SMIB terjadi melalui tahapan-tahapan berikut :

1. Pembentukan lapisan terluar (*coating*) chitosan yang melapisi inti biomassa sebagai langkah imobilisasi biomassa,
2. Imprinting ion logam terpilih pada permukaan lapisan *coating* chitosan
3. Pelepasan ion imprinted melalui desorpsi kimia. Pada proses ini, ion yang dilepaskan akan menyediakan templat/ruang kosong yang dapat digunakan untuk adsorpsi jenis ion yang sejenis secara selektif.
4. Adsorpsi ion logam yang dikehendaki pada ruang kosong

(templat) yang telah disiapkan melalui imprinting molekular.

Pada proses coating chitosan pada permukaan biomassa, terlebih dahulu chitosan dimodifikasi dalam bentuk gel. Pelarutan chitosan dalam bentuk gel ini bertujuan untuk menata ulang susunan antara layer pada polimer chitosan. Proses ini memengaruhi ikatan hidrogen antar molekul chitosan dan membuat rantai polimer teregang, mengakibatkan pori-pori chitosan terbuka sehingga lebih banyak situs aktif yang dapat diakses oleh ion logam. Pelarutan akan menurunkan kristalinitas chitosan sehingga meningkatkan fleksibilitasnya untuk digunakan lebih lanjut sebagai adsorben. Penata ulangan susunan monomer pada struktur polimer chitosan juga memungkinkan material yang teradsorpsi tidak mudah terlepas kembali sehingga lebih menguntungkan dalam hal stabilitas adsorben yang dihasilkan.

Karakterisasi adsorpsi ion logam target Cu(II) dan Cd(II) pada SMIB

Karakterisasi adsorpsi ion logam target Cu(II) dan Cd(II) pada SMIB hasil penelitian dilakukan untuk menentukan parameter utama kemampuan biosorben yang diverifikasi melalui kapasitas maksimum adsorpsi ($a_{m=}$). Penentuan kapasitas adsorpsi dilakukan pada kondisi waktu dan pH optimum adsorpsi yang telah terlebih dahulu ditentukan. Pada penelitian ini digunakan waktu optimum adsorpsi 120 menit pada pH optimum 5-6.

Penentuan kapasitas adsorpsi dilakukan dengan cara menginteraksikan sebanyak masing-masing 0,1 gram biosorben dengan 10 mL larutan ion logam selama 120 menit adsorpsi dengan konsentrasi ion logam yang divariasi pada kisaran 10-1000 mg/L. Selanjutnya biosorben dipisahkan dengan cara penyaringan dan kandungan logam sisa teradsorpsi ditentukan secara spektrofotometri serapan atom.

Penentuan kapasitas adsorpsi ion logam pada adsorben dilakukan menggunakan model isoterm adsorpsi Langmuir (Oscik, 1982). Penerapan model adsorpsi Langmuir memperlihatkan adanya hubungan linear antara C_{eq}/C_{ads} dengan C_{eq} ,

$$\frac{C_{eq}}{n} = \frac{1}{a_m K} + \frac{1}{a_m} C_{eq}$$

seperti ditunjukkan melalui persamaan berikut (Oscik, 1982):

dengan

C_{eq} : konsentrasi ion logam dalam kesetimbangan

n : Jumlah ion teradsorpsi per gram adsorben

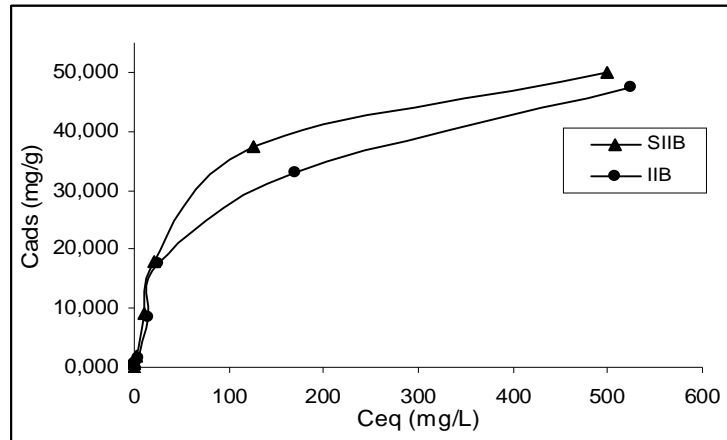
a_m : kapasitas maksimum adsorpsi

K : afinitas adsorpsi (konstanta kesetimbangan adsorpsi)

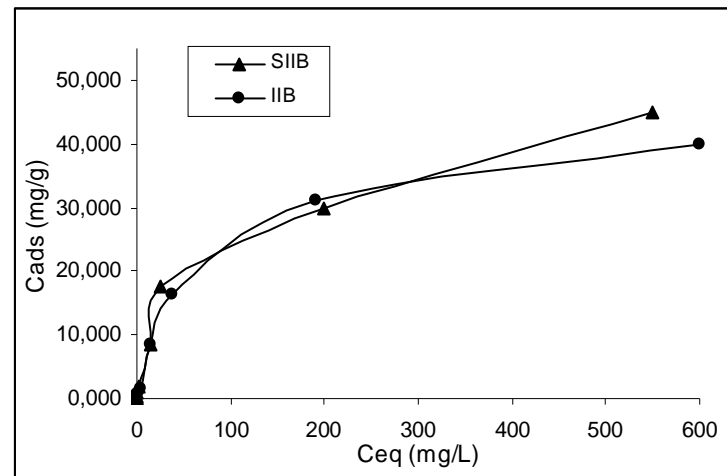
Harga kapasitas maksimum adsorpsi (a_m) ditentukan dari slope garis lurus hasil plot C_{eq}/n terhadap C_{eq} .

Model isoterm adsorpsi digunakan untuk menentukan kapasitas adsorpsi dan menunjukkan korelasi antara aktifitas adsorbat dengan jumlah zat teradsorpsi pada temperatur konstan. Model isoterm Langmuir mengasumsikan bahwa permukaan adsorben adalah homogen dan besarnya energi adsorpsi ekuivalen untuk setiap situs adsorpsi. Adsorpsi secara kimia terjadi karena adanya interaksi antara situs aktif adsorben dengan zat teradsorpsi. Interaksi kimia hanya terjadi pada lapisan penyerapan tunggal (*monolayer adsorption*) permukaan dinding sel adsorben (Oscik, 1982).

Penentuan kapasitas adsorpsi menggunakan model isoterm Langmuir dikaji pada kurva isoterm adsorpsi yang dibuat dengan cara memplot konsentrasi ion logam dalam kesetimbangan (mg/L) versus jumlah ion logam yang teradsorpsi (mg/g). Kurva isoterm adsorpsi logam Cu(II) dan Cd(II) pada SMIB dibandingkan dengan MIB disajikan melalui gambar 2 dan 3.



Gambar 2. Kurva isoterm adsorpsi Cu(II) pada SMIB dan non-SMIB



Gambar 3. Kurva isoterm adsorpsi Cd(II) pada SMIB dan non-SMIB

Pola adsorpsi Cu(II) dan Cd(II) pada SMIB dan MIB seperti ditunjukkan melalui gambar 2 dan 3 memperlihatkan peningkatan secara tajam pada awal konsentrasi kesetimbangan. Pada peningkatan konsentrasi berikutnya, penambahan jumlah ion logam relatif sedikit sampai tercapai keadaan yang relatif konstan yakni pada konsentrasi sekitar 500 mg/L. Hal ini mengindikasikan bahwa adsorben telah mulai jenuh oleh

adsorbat atau tercapai kondisi kesetimbangan adsorpsi-desorpsi. Menurut Langmuir dalam Oscik (1982), pada permukaan adsorben terdapat sejumlah situs aktif yang proporsional dengan luas permukaan penyerapan. Jadi dengan memperbesar konsentrasi ion yang dikontakkan sementara berat adsorben tetap, adsorpsi ion logam meningkat secara linear sampai

konsentrasi tertentu. Bila situs adsorpsi telah jenuh dengan adsorbat, maka kenaikan konsentrasi relatif tidak meningkatkan jumlah zat teradsorpsi.

Perhitungan menggunakan persamaan linear isoterm adsorpsi Langmuir menghasilkan harga kapasitas maksimum adsorpsi (a_m) seperti yang disajikan melalui tabel.

Tabel 1. Konstanta isoterm Langmuir untuk adsorpsi Cu(II)

Adsorbent	Q_{max} (mg/g)	b (L/mg)	R^2
SMIB	53,1918	0,0131	0,9883
Non-SMIB	51,5469	0,0219	0,9625

Tabel 2. Konstanta isoterm Langmuir untuk adsorpsi Cd(II)

Adsorbent	Q_{max} (mg/g)	R^2
SMIB	47,3933	0,9704
MIB	44,2480	0,9551

Dari tabel 1 dan 2 terlihat bahwa adsorpsi kedua ion logam mengikuti dengan baik model isoterm adsorpsi Langmuir yang ditunjukkan dengan harga koefisien relatif (R^2) dengan tingkat kepercayaan di atas 95%. Dari harga korelasi tersebut dapat disimpulkan bahwa adsorpsi ion Cu(II) dan Cd(II) pada biomassa SMIB dan non-SMIB dapat dimodelkan menggunakan isoterm adsorpsi Langmuir. Hal ini juga membuktikan bahwa adsorpsi logam Cu(II) dan Cd(II) pada SMIB dan non-SMIB terutama terjadi melalui mekanisme adsorpsi kimia pada permukaan monolayer adsorben terjadi secara spesifik dan kuat pada situs aktif yang juga spesifik.

Adsorpsi ion logam Cu(II) pada SMIB hasil penelitian ini mempunyai nilai kapasitas sekitar 20% lebih tinggi dibandingkan hasil penelitian Su *et al.*, (2005) yang mensintesis SMIB dengan *core material* dari biomassa *Penicillium chysogenum* untuk adsorpsi selektif ion Ni(II). Hasil penelitian Su menyebutkan bahwa kapasitas adsorpsi ion Ni(II) pada SMIB hasil penelitiannya hanya 84% dibandingkan pada non-SMIB. Kapasitas adsorpsi Cu(II) pada SMIB yang relatif tinggi pada penelitian ini dipertimbangkan merupakan kontribusi dari biomassa *Chlorella* yang digunakan. Keberadaan biomassa sebagai material penunjang SMIB diperkirakan berperan untuk

membuka lebih banyak situs aktif pada proses penataan susunan layer chitosan. Alasan lain adalah bahwa gugus-gugus fungsional pada biomassa diperkirakan juga berperan dalam proses pengikatan ion logam.

Ketika rasio chitosan ; ion logam pada tahap imprinting dikontrol dengan teliti maka seberapa besar situs aktif chitosan digunakan untuk mengkhelat ion logam (untuk pembentukan templat pada biosorben) dan hanya sebagian kecil yang digunakan untuk reaksi crosslinking. Sehingga, kapasitas adsorpsi SMIB tetap tinggi tanpa kehilangan stabilitasnya dalam medium asam.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat diambil beberapa kesimpulan penting sebagai berikut :

- a. Teknik Imprinting permukaan molekular merupakan cara yang relatif sederhana dan cepat untuk diterapkan pada proses preparasi biosorben yang bersifat selektif terhadap ion logam tertentu.
- b. SMIB hasil penelitian mempunyai kapasitas yang relatif tinggi dibandingkan non-SMIB sehingga cukup prospektif untuk diterapkan pada proses pemisahan atau ekstraksi ion logam tertentu dalam sistem campuran.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada DP2M Dikti Departemen Pendidikan Nasional yang telah memberikan

dana bantuan penelitian ini melalui Hibah Penelitian Sesuai Prioritas Nasional Tahun 2009.

DAFTAR PUSTAKA

- Ersoz A, Say R dan Denizli A, 2004, Ni(II) Ion-Imprinted Solid-Phase Extraction And Preconcentration in Aqueous Solutions by Packed-Bed Columns, *Anal.Chim.Acta*, 502: 91-97
- Fu GQ, Yu H dan Zhu J, 2008, Imprinting Effect of protein-Imprinted Polymer Composed of Chitosan and Polyacrilamide : A re-examination, *Biomar*, 29: 2138-2142
- Guibal E, 2004, Interactions of Metal Ions with Chitosan-based Sorbents : A Review, *Sep.Purif.Technol*, 38: 43-74
- Rinaudo M, 2006, Chitin and Chitosan : properties And Applications, *Progress in Pol.Sci*, Vol 31: 603-632
- Su HJ, Wang Z dan Tan TW, 2003, Adsorption of Ni²⁺ on The Surface of Molecularly Imprinted Adsorbent from *Penicillium Chysogenum* Micellium, *Biotechnol.Lett*, 25_ 949-953
- Su HJ, Wang ZX dan Tan TW, 2005, Preparatuion of Surface Molecular Imprinted Adsorbent for Ni based on *Penicillium chysogenum*, *J.Chem.technol.Biotechnol*, 4 (80) : 439-444

Su HJ, Zhao Y, Li, J dan Tan TW, 2006, Biosorption of Ni²⁺ by the Surface Molecular Imprinting Adsorbent, *Procc.Biochem*, 41: 1422-1426

Su H, Li J dan Tan T, 2008, Adsorption Mechanism for Imprinted ion (Ni²⁺) of the Surface Molecular Imprinting Adsorbent (SMIA), *Biochem.Eng.J*, doi:10.1016/j/bej.2007.11.011, (in press)

PEMANFAATAN PTSA-KAOLINIT SEBAGAI KATALIS PEMBUATAN BIODIESEL DARI LIMBAH KELAPA SAWIT (*SLUDGE OIL*)

Thamrin Usman, Winda Rahmalia, dan Nelly Wahyuni

Staf Pengajar Fakultas MIPA Jurusan Kimia Universitas Tanjungpura

ABSTRAK

Dalam penelitian ini telah dilakukan metode esterifikasi terhadap *sludge oil* dengan menggunakan katalis PTSA-kaolinit, yaitu kaolinit yang teremban oleh asam *p*-toluena sulfonat, sehingga pada akhir reaksi katalis dapat dipisahkan dengan hanya melakukan sentrifugasi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada konsentrasi katalis PTSA-kaolinit 4% dengan lama reaksi 4 jam dihasilkan konversi asam lemak yang berubah menjadi metil ester sebesar 96,44%. Karakterisasi fisika metil ester yang dihasilkan antara lain memiliki indeks bias, viskositas dan densitas yang sesuai dengan standar baku metil ester komersial,

Kata kunci: esterifikasi, *sludge oil*, kaolinit, PTSA

PENDAHULUAN

Minyak diesel merupakan salah satu fraksi minyak bumi yang tak terbarukan dan berasal dari penguraian fosil-fosil makhluk hidup yang terpendam di dalam tanah dalam waktu yang lama. Minyak diesel banyak digunakan terutama pada bidang pertanian, pertambangan, transportasi, pembangkit tenaga listrik dan industri.

Peningkatan volume konsumsi minyak diesel dan terbatasnya ketersediaan minyak diesel mendorong upaya pencarian sumber energi alternatif baru sebagai bahan bakar pengganti sehingga dapat menghemat persediaan minyak bumi. Salah satu sumber daya yang memenuhi kriteria tidak merusak lingkungan, berasal dari sumber

energi terbarukan, efisien digunakan dan harganya terjangkau sebagai sumber energi alternatif adalah biodiesel dari minyak nabati (Rahman, 1995).

Salah satu minyak nabati yang potensial dimanfaatkan di Kalimantan Barat adalah minyak kelapa sawit (lebih dikenal dengan minyak sawit mentah). Namun penggunaan minyak sawit mentah untuk sektor pangan yang berorientasi ekspor menjadi alternatif penggunaan yang kompetitif (Usman, 2005). Oleh karena itu perlu dicari bagian lain dari minyak sawit mentah. Salah satu yang potensial adalah *sludge oil*, yaitu limbah dari pabrik pengolahan minyak sawit mentah, yang pada suhu kamar berupa lumpur padat (Usman, 2006).

Hingga saat ini *sludge oil* hanya digunakan sebagai pakan ternak dan selebihnya dibiarkan begitu saja mencemari lingkungan. Jika dikaji secara teoritis, *sludge oil* kelapa sawit tersedia dalam jumlah yang banyak dengan kandungan asam lemak bebas 30-80%. Diantara asam lemak bebas dalam *sludge oil* adalah asam kaproat, asam laurat, asam miristat, asam palmitat, asam oleat, asam stearat, dan asam linoleat (Zandy *et al.*, 2007). Melalui proses esterifikasi, asam lemak tersebut dapat dikonversi menjadi alkil ester yang merupakan senyawa utama dari biodiesel (Tarigan, 2002; Usman *et al.*, 2005). Agar produk alkil ester dihasilkan dalam jumlah dan waktu optimum, diperlukan suatu katalis asam (Usman *et al.*, 2005; Wilbraham & Matta, 1987).

Pada umumnya katalis asam yang digunakan pada esterifikasi pembuatan biodiesel adalah katalis homogen. Namun penggunaan katalis homogen, pemurniannya pada akhir reaksi harus melalui tahapan yang rumit. Katalis heterogen lebih diminati penggunaannya karena dapat lebih mudah dipisahkan dari campuran reaksi dibanding katalis homogen (Lukic *et al.*, 2007)

Penelitian ini mengusulkan sintesis biodiesel dari bahan baku *sludge oil* dengan metode esterifikasi menggunakan katalis PTSA-kaolinit, yaitu asam *p*-toluena sulfonat yang terembankan pada matriks padat kaolinit. Katalis ini bersifat heterogen sehingga dapat dengan mudah dipisahkan pada akhir reaksi. Jadi, keuntungan menggunakan katalis

heterogen ini adalah kemudahan pada proses pemurnian produk akhir.

Kondisi optimum reaksi esterifikasi dapat diperoleh dengan pengaturan kuantitas katalis yang tepat. Menurut Rasidi (2004) hal ini disebabkan reaksi esterifikasi merupakan reaksi kesetimbangan. Reaksi juga dapat cepat mencapai kesetimbangan dengan penggunaan konsentrasi katalis yang tepat (Hart *et al.*, 2003).

METODE PENELITIAN

Alat

Alat-alat utama yang digunakan diantaranya adalah seperangkat alat refluks, viskometer, piknometer, densitometer, *centrifuse*, difraktometer sinar-X.

Bahan

Bahan baku yang digunakan adalah lempung alam yang diambil dari Desa Capkala Kabupaten Bengkayang Propinsi Kalimantan Barat dan *sludge oil* yang diambil dari PPKS PT. Sime Indo Agro BACPOM Kabupaten Sanggau Propinsi Kalimantan Barat. Sedangkan bahan kimia yang digunakan antara lain etanol (C₂H₅OH) p.a, kalium hidroksida (KOH) p.a., kertas saring, metanol (CH₃OH) p.a, metilen klorida (CH₂Cl₂) p.a, natrium klorida (NaCl) p.a, natrium sulfat (Na₂SO₄) anhidrat, n-heksan teknis, plat silika gel 60 GF₂₅₄.

Prosedur Kerja

Persiapan sampel *sludge oil*

Sludge oil diambil sebanyak 1 kg. Setelah itu diaduk sambil dipanaskan selama 1 menit. Sampel ditentukan kadar air dan bilangan asamnya.

Esterifikasi asam lemak *sludge oil* dengan katalis PTSA-Kaolinit

a. Preparasi sampel lempung alam untuk memperoleh kaolinit

Preparasi sampel lempung dilakukan dengan mengadopsi metode Guerra *et al.* (2004). Lempung dicuci dengan akuades sebanyak 3 kali dan didiamkan hingga pasir yang terdapat dalam sampel lempung terendapkan. Suspensi kemudian disentrifugasi dengan kecepatan 3000 rpm selama 15 menit. Endapan hasil sentrifugasi kemudian dipanaskan pada temperatur 80°C selama 5 jam, dihaluskan dan dilakukan pengayakan dengan ayakan ukuran 120 *mesh*. Lempung alam hasil preparasi kemudian dikarakterisasi dengan menggunakan XRD.

b. Pembuatan katalis PTSA-kaolinit

Katalis PTSA-kaolinit diperoleh dari impregnasi antara PTSA dengan kaolinit dalam media air. Sebanyak 2 g kaolinit dimasukkan dalam 8 ml akuades dan diaduk selama 3 jam. Ke dalam suspensi ditambahkan sedikit demi sedikit larutan, selanjutnya dilakukan pengadukan kontinu dengan *stirrer* selama 24 jam.

Setelah itu suspensi disaring dengan kertas saring biasa. Residu dipanaskan pada temperatur 80°C selama 24 jam. Katalis kering dihaluskan dan siap digunakan untuk proses esterifikasi.

c. Esterifikasi terhadap *sludge oil*

Esterifikasi asam lemak *sludge oil* dilakukan dengan mencampurkan sampel *sludge oil* dan metanol (perbandingan mol 1: 12). Selanjutnya ditambahkan 0,308 g katalis PTSA-kaolinit, dipanaskan pada temperatur $\pm 67^{\circ}\text{C}$ sambil diaduk dengan *stirrer*. Reaksi diikuti dengan teknik kromatografi lapis tipis menggunakan eluen yang sesuai. Lamanya reaksi adalah 4 jam.

Produk hasil esterifikasi disentrifugasi untuk memisahkan katalis, kemudian dimasukkan ke dalam corong pisah dan dicuci dengan menambahkan larutan NaCl jenuh. Pencucian dilakukan hingga produk yang dihasilkan menjadi netral. Lapisan atas dipisahkan dan ditambahkan Na₂SO₄ anhidrat. Produk dievaporasi sehingga dihasilkan produk metil ester yang murni. Akhirnya persentase asam lemak bebas (*Free Fatty Acid, FFA*).

Sampel *sludge oil* yang belum direaksikan dan produk metil ester yang terbentuk masing-masing ditotolkan pada plat KLT. Setelah itu, dielusidasi menggunakan eluen campuran *n*-heksan dan diklorometana dengan perbandingan 2:1. Plat KLT yang telah dielusidasi dikeringkan kemudian dilihat pola noda dengan lampu UV. Setelah itu, plat KLT disemprot dengan larutan H₂SO₄ 10% kemudian dipanaskan

hingga pola noda nampak dengan jelas.

Persentase konversi produk dihasilkan dengan menentukan

kandungan asam lemak bebas *sludge oil* sebelum dan setelah esterifikasi.

Rumusnya mengikuti persamaan berikut:

$$\text{Persentase konversi produk} = \frac{(\% \text{ FFA awal} - \% \text{ FFA akhir})}{\% \text{ FFA awal}} \times 100\%$$

Esterifikasi asam lemak *sludge oil* dengan katalis PTSA

Sebagai pembandingan, juga dilakukan proses esterifikasi asam lemak dari *sludge oil* menggunakan katalis PTSA murni. Kondisi rasio molar, jumlah katalis dan waktu reaksi dibuat sama. Hanya saja pada esterifikasi menggunakan katalis PTSA pada akhir reaksi dilakukan pemisahan katalis dengan pelarut *n*-heksan yang kemudian dilanjutkan dengan evaporasi.

Karakterisasi fisika produk

Produk metil ester yang telah bebas pelarut dan sisa katalis ini kemudian dikarakterisasi sifat fisik dan kimianya yang meliputi warna, berat jenis, indeks bias, kelarutan, dan viskositas.

HASIL DAN PEMBAHASAN Preparasi dan Karakterisasi Sampel Kaolinit

Sampel yang digunakan dalam penelitian ini adalah sampel lempung yang berasal dari pemisahan fraksi lempung alam yang diambil dari Desa Capkala Kabupaten Bengkayang Propinsi Kalimantan

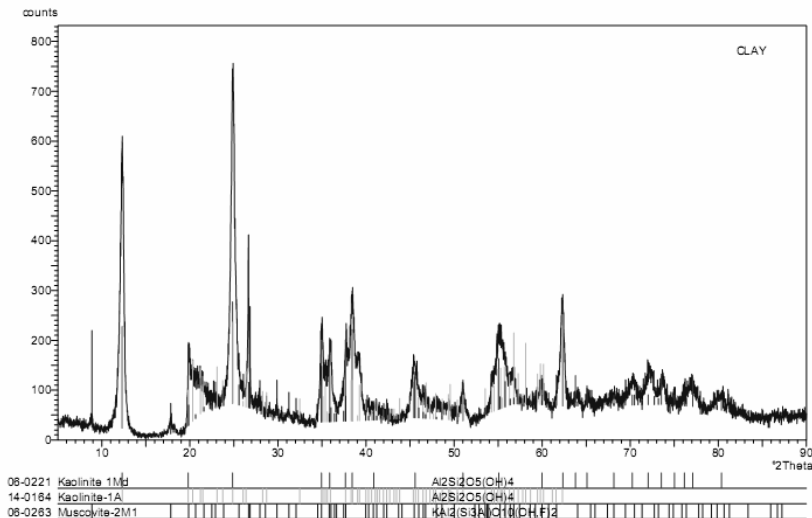
Barat. Adapun proses pencucian, pengendapan dan sentrifugasi yang dilakukan terhadap sampel lempung bertujuan agar lempung terbebas dari pasir dan lumpur.

Karakterisasi lempung alam Capkala hasil preparasi kemudian dilakukan karena lempung alam umumnya ditentukan dalam bentuk campuran beberapa jenis lempung. Aplikasi komersial biasanya didasarkan pada dominansi suatu jenis lempung tertentu dibandingkan dengan jenis lempung yang lain. Lempung plastis misalnya, merupakan lempung alam dengan kandungan terbesar dari jenis lempung kaolinit (Clausen *et al.*, 2001). Lempung alam yang digunakan sebagai bahan dasar dalam penelitian ini juga sangat mungkin merupakan campuran berbagai mineral. Oleh karena itu perlu dilakukan analisis dengan menggunakan difraksi sinar-x. Dasar penggunaan sinar-x dalam penelitian lempung adalah susunan sistematis atom-atom atau ion-ion dalam bidang kristal. Setiap spesies mineral dicirikan oleh susunan atom yang spesifik, yang menciptakan bidang

atom penciri yang dapat memantulkan sinar-x.

Tan (1995) mengatakan bahwa identifikasi mineral kaolinit ditunjukkan oleh difraksi sinar-x, dimana terjadinya serapan yang kuat pada jarak dasar d_{001} sebesar 7,13 yang bersesuaian dengan sudut $2\theta =$

$12,40^\circ$ atau pada difraksi order kedua dengan jarak sebesar 3,56 yang bersesuaian dengan sudut $2\theta = 25,00^\circ$. Hasil analisis difraksi sinar-x terhadap sampel lempung dalam penelitian ini disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Difraktogram sampel lempung

Gambar 1 menunjukkan adanya serapan pada sudut $2\theta = 12,31^\circ$ yang bersesuaian dengan jarak $d = 7,13$ serta serapan kuat pada sudut $2\theta = 24,81^\circ$ yang bersesuaian dengan jarak $d = 3,59$ sedangkan puncak-puncak yang lain menunjukkan serapan yang jauh lebih kecil, sehingga dapat disimpulkan bahwa mineral utama penyusun lempung dalam penelitian ini adalah kaolinit.

Pembuatan Katalis PTSA-Kaolinit

Pembuatan katalis PTSA-kaolinit bertujuan untuk menghasilkan katalis heterogen yang dapat digunakan dalam proses esterifikasi asam lemak *sludge oil* untuk menghasilkan komponen utama biodiesel (metil ester). Metode impregnasi dalam media cair dilakukan karena kaolinit bersifat mengembang di dalam air. Pengembangan kaolinit ini diharapkan mampu membantu terikatnya PTSA

pada gugus-gugus fungsi kaolinit baik yang terdapat pada antarlapis maupun permukaan kaolinit.



Gambar 2. Katalis PTSA-Kaolinit

Dari segi struktur kimianya, diasumsikan antara PTSA dan kaolinit dapat terjadi ikatan hidrogen antara gugus O-H yang terdapat pada kaolinit dengan gugus S-O pada PTSA. Juga bisa diasumsikan terjadi ikatan hidrogen antara gugus O-H dalam kaolinit tersebut dengan gugus C-H pada PTSA. Namun dibutuhkan analisis lebih lanjut untuk membuktikan hal ini. Dalam penelitian ini pembuktian terembannya PTSA pada kaolinit dilakukan dengan menentukan pKa PTSA sebelum dan sesudah diimbangkan.

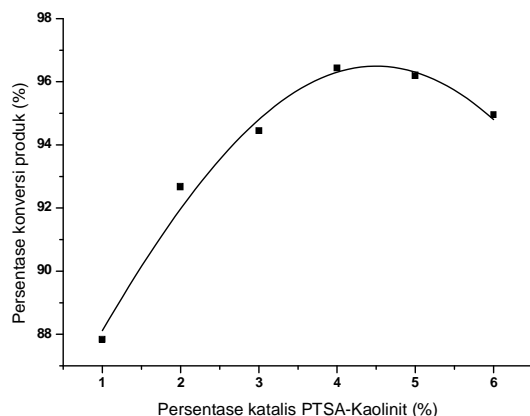
Esterifikasi Sludge Oil dengan Katalis Kaolinit, PTSA, dan PTSA-Kaolinit

Esterifikasi merupakan metode untuk menghasilkan biodiesel dari bahan baku yang memiliki keasaman yang tinggi, sehingga diperlukan suatu katalis yang bersifat asam pula untuk mempercepat terjadinya pembentukan produk yang diinginkan. Metode dan kondisi esterifikasi yang dilakukan mengadopsi metode Fahrianto (2006) yang melakukan esterifikasi cpo *reject* dengan katalis PTSA.

Sebagaimana yang telah diketahui bahwa katalis adalah suatu zat yang mempercepat laju reaksi kimia pada suhu tertentu, tanpa mengalami perubahan atau terpakai oleh reaksi itu sendiri. Peran katalis dalam reaksi esterifikasi adalah penting karena juga dapat mempengaruhi tingginya konversi produk metil ester yang terbentuk. Namun penggunaan katalis pada konsentrasi yang berlebih akan menyebabkan terjadinya reaksi penyabunan sehingga justru mengurangi konversi produk. Oleh karena itu dalam penelitian ini dilakukan uji pengaruh konsentrasi katalis PTSA-kaolinit hasil impregnasi terhadap produk metil ester yang terbentuk (Tabel 1 dan Gambar 3).

Tabel 1. Pengaruh Konsentrasi Katalis terhadap Penurunan Kadar Asam Lemak dan Konversi Produk Metil Ester

Konsentrasi Katalis (%)	Kadar Asam Lemak (%)
0	67,11
1	8,16
2	4,91
3	3,72
4	2,39
5	2,55
6	3,39



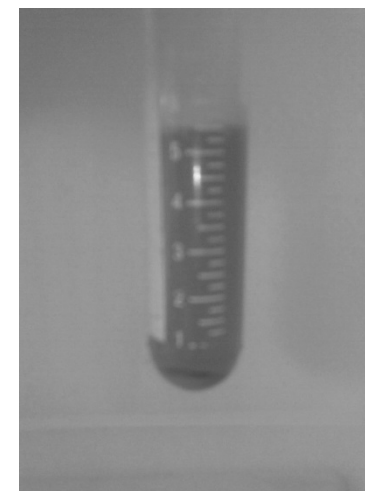
Gambar 3. Hubungan konsentrasi katalis PTSA-kaolinit terhadap persentase konversi produk

Seperti teramati pada Tabel 1 dan Gambar 3, esterifikasi asam lemak *sludge oil* menggunakan katalis PTSA-kaolinit pada 67°C menunjukkan bahwa konsentrasi katalis dengan konversi asam lemak menjadi metil ester tertinggi (96,44 %) dicapai pada konsentrasi katalis 4% dari total asam lemak dari *sludge oil*. Pada konsentrasi katalis yang lebih tinggi justru diperoleh konversi produk yang lebih rendah karena sejumlah katalis berlebih memberikan kecenderungan pada pembentukan emulsi sehingga meningkatkan viskositas dan menimbulkan terbentuknya gel sebelum waktu reaksi yang diinginkan tercapai. Hal ini menyulitkan pada pemisahan gliserol, sehingga harus dilakukan pemanasan campuran metil ester dan secara nyata konversi metil ester yang dihasilkan akan berkurang.

Produk metil ester yang dihasilkan pada konsentrasi katalis optimum memiliki karakteristik sifat fisika seperti kerapatan 0,880 g/mL (temperatur 25°C), viskositas 6,975 cSt dan indeks bias 1,454. Hasil ini memenuhi standar metil ester komersial.

Keunggulan Katalis PTSA-Kaolinit

Sebagai katalis heterogen, PTSA-kaolinit memiliki keunggulan dalam hal metode pemurniannya dari produk yang relatif lebih mudah. Pemurniannya dilakukan hanya secara fisika, tanpa menggunakan pelarut kimia yang spesifik. Selain itu katalis ini juga dapat digunakan kembali untuk proses yang sama.



Gambar 4. Hasil pemisahan katalis dari campuran produk

Persentase konversi produk metil ester dari *sludge oil* menggunakan katalis PTSA-kaolinit ini juga lebih tinggi daripada persentase konversi produk metil ester yang diperoleh dari esterifikasi menggunakan katalis PTSA, yaitu 94,25%. Hal ini disebabkan karena keasaman katalis meningkat dengan adanya situs asam lewis pada kaolinit. Kemampuan kaolinit sendiri untuk menyerap asam lemak bebas, juga membantu peran katalis PTSA-kaolinit dalam meningkatkan persentase konversi produk.

KESIMPULAN

PTSA-kaolinit mampu berperan sebagai katalis esterifikasi limbah *sludge oil* dengan metanol sebagai pelarut. Dimana pada kondisi temperatur 67°C, reaksi selama 4 jam, diperoleh konsentrasi optimum katalis adalah 4%. Pada konsentrasi

optimum ini berhasil mengkonversi asam lemak *sludge oil* menjadi metil ester sebesar 94,66%. Hasilnya bahkan lebih besar daripada konversi produk metil ester dengan katalis PTSA yang tak terembankan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada DP2M Ditjen Dikti atas dukungan dana yang diberikan melalui Hibah Kompetitif Penelitian Sesuai Prioritas Nasional Batch II Tahun Anggaran 2009, sehingga penelitian ini terlaksana.

DAFTAR PUSTAKA

- Clausen, L.; Fabricus, I. and Madsen, L., 2001, Adsorption of Pesticides onto Quartz, Calcite, Kaolinite, and α -Alumina, *J. Environ. Qual.*, 30: 846-857.
- Fahrianto, 2006, Esterifikasi Asam Lemak Bebas dari Limbah Minyak Sawit Mentah dengan Etanol Menggunakan Katalis Asam p-Toluena Sulfonat, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Tanjungpura, Pontianak, (skripsi).
- Guerra, D. L.; Lemos, V. P.; Angelica, R. S. and Costa, M. L., 2004, Synthesis and Characterization of Pillared Smectites with Al, *Applied Mineralogy*, 85: 65-68.
- Hart, H., Craine, L.E., and Hart, D.J., 2003, Kimia Organik, Achmadi S.S. (alih bahasa), Erlangga, Jakarta.
- Lukic, I., Aleksandar, M.O., and Dejan, U.S., 2007, Preparation of Heterogeneous Catalyst for

- Biodiesel Synthesis, Department of Organic Chemical Technology, Faculty of Technology and Metallurgy, Karnegijeva 4, Belgrade, 11000, Serbia and Montenegro.
- Rahman, M., 1995, Biodiesel: Alternatif Substitusi Solar yang Menjanjikan di Indonesia, *Lembaran Publikasi Lemigas* No.1/95 pp33-95.
- Rasidi, 2004, Kinetika Esterifikasi Asam Lemak Bebas dari Minyak Sawit, Central Library Institute Technology Bandung.
- Tan, K. H., 1995, Dasar-Dasar Kimia Tanah, Goenadi, D. H. (alih bahasa), Radjagukguk, B. (ed), Gajah Mada University Press, Yogyakarta.
- Tarigan, J.B., 2002, Ester Asam Lemak, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sumatera Utara, USU digital library.
- Usman, T., 2005, Prospek Kalimantan Barat Sebagai Produsen Utama Bahan Bakar Minyak (BBM) Alternatif, (Orasi Ilmiah).
- Usman, T., Fahrianto, dan Andi, K. A., 2005, Esterifikasi Asam Lemak Bebas dari Limbah Minyak Sawit Mentah dengan Etanol Menggunakan Katalis *p*-toluena sulfonat, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Tanjungpura, (Skripsi).
- Usman, T., 2006, Bioenergi dari Asam Lemak, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Tanjungpura.
- Wilbraham, A.C., dan Matta, M.S., 1987, Pengantar Kimia Organik dan Hayati, Jilid I, Achmadi, S.S. (alih bahasa), ITB press, Bandung.
- Zandy, A., Mescha, D., Nazef, dan Soraya, P., 2007, Intensifikasi Proses Produksi Biodiesel, ITB & PT. Rekayasa Industri, (Lomba Karya Ilmiah Mahasiswa ITB Bidang Energi Penghargaan PT. Rekayasa Industri).