



**MODEL NUMERIK DISPERSI SEDIMEN
AKIBAT PASANG SURUT DI PANTAI**

TESIS

Disusun Dalam Rangka memenuhi Salah Satu Persyaratan
Program Magister teknik Sipil
oleh

Hendro Riyanto
NIM : L4A099021

**PROGRAM PASCA SARJANA
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG
2004**

IPPT-PUSTAK-UNDIP

LEMBAR PENGESAHAN

MODEL NUMERIK DISPERSI SEDIMEN AKIBAT PASANG SURUT DI PANTAI

Disusun oleh

Hendro Riyanto

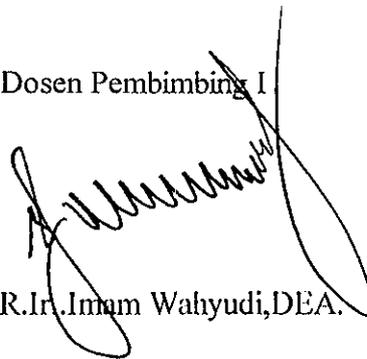
NIM : 14A099021

Tesis ini Disusun Dalam Rangka memenuhi Salah Satu Persyaratan
Program Magister teknik Sipil Universitas Diponegoro

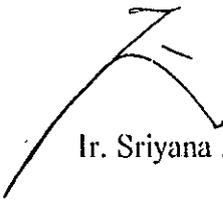
Semarang, juni,2004

Disetujui :

Dosen Pembimbing I


DR. Ir. Imam Wahyudi, DEA.

Dosen Pembimbing II


Ir. Sriyana .MS.

MODEL NUMERIK DISPERSI SEDIMEN AKIBAT PASANG SURUT DI PANTAI

Disusun oleh

Hendro Riyanto

NIM : L4A099021

Dipertahankan Pada Tim Penguji pada tanggal :

10 September ,2004

Tesis ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk
Memperoleh gelar Magister Teknik Sipil

Tim Penguji

- | | |
|-----------------------------|-------------------|
| 1. Dr.Ir..Imam Wahyudi,DEA | (Ketua)..... |
| 2. Ir.Sriyana,MS | (Sekretaris)..... |
| 3. Dr.Ir. Suripin, M.Eng | (Anggota 1)..... |
| 4. Dr.Ir. RY.Kodoatie,M.Eng | (Anggota 2)..... |
| 5. Ir. Salamun,MS | (Anggota 3)..... |

Semarang,10, September,2004

Universitas Diponegoro
Program Pasca Sarjana
Magister Teknik Sipil



KATA PENGANTAR

Dengan memanjatkan puji syukur kepada Allah SWT atas karunia, hidayah, dan berkah-Nya yang begitu besar, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis Magister yang berjudul **MODEL NUMERIK DISPERSI SEDIMEN AKIBAT PASANG SURUT DIPANTAI**. Tesis ini disusun sebagai syarat kelulusan pada Program Magister Teknik Sipil, Program Pascasarjana Universitas Diponegoro Semarang.

Tesis ini berusaha mengkaji karakteristik aliran yang terjadi pada perairan pantai sebagai akibat gelombang pasang surut, dimana pola aliran pada perairan pantai tersebut pada akhirnya akan menentukan terjadinya pola dispersi sedimen tersuspensi yang berasal dari muara sungai ke arah laut sesuai dengan karakteristik aliran pada estuari tersebut.

Lokasi penelitian sebagai verifikasi model dilakukan di Perairan Pantai muara Banjir Kanal Timur Semarang. Kajian ini dilakukan dengan membangun model penyebaran sedimen dari muara ke arah laut melalui pendekatan metode numerik dengan memperhatikan fenomena yang berkaitan dengan proses-proses fisik yang menyertainya.

Harapan dalam penulisan dan penyusunan Tesis ini adalah agar hasil penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai bahan masukan dalam pengembangan model sebaran sedimen tersuspensi perairan pantai dan sebagai informasi untuk menyusun strategi pengelolaan dan pemantauan lingkungan yang terintegrasi di perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang khususnya dan perairan pantai di Indonesia pada umumnya.

Penulis menyadari bahwa penulisan dan penyusunan Tesis ini sangatlah jauh dari sempurna, untuk itu diharapkan saran, kritik, dan perbaikan guna pengembangan khasanah ilmu pengetahuan dan teknologi.

Semarang, Juni 2004

Penulis

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini, penulis sampaikan ucapan terima kasih yang tulus kepada

1. **DR.Ir.Suripin,M.Eng**, Selaku ketua Program Magister Teknik Sipil Jurusan Sumber Daya Air, Universitas Diponegoro atas saran, masukan, dan arahan dalam menyelesaikan studi dan tesis ini.
2. **Dr.Ir.Imam Wahyudi,DEA**, selaku Dosen Pembimbing I, yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan dorongan dalam menyelesaikan studi dan tesis ini.
3. **Ir.Sriyana,MS**,selaku dosen pembimbingII,yang telah memberikan bimbingan, arahan,dan dorongan dalam menyelesaikan studi dan tesis ini.
4. **Ir.Salamun ,MS**, Selaku dosen Penguji yang telah banyak memberikan saran, masukan, dan arahan dalam menyelesaikan studi dan tesis ini.
5. **Dr.Ir. RY.Kodoati.M.Eng**. Selaku dosen Penguji yang telah banyak memberikan saran, masukan, dan arahan dalam menyelesaikan studi dan tesis ini.
6. **DR.Ir.Suharyanto,Msc**, Selaku dosen Penguji yang telah banyak memberikan saran, masukan, dan arahan dalam menyelesaikan studi dan tesis ini.
7. Seluruh staf pengajar Program Magister Teknik Sipil konsentrasi Sumber Daya Air Universitas Diponegoro Semarang, Staf Tata Usaha atas bantuan yang diberikan selama menempuh studi.
8. Rekan-rekan Program Magister Teknik Sipil konsentrasi Sumber Daya Air Universitas Diponegoro Semarang atas bantuan, dorongan, dan semangat yang diberikan selama menempuh studi.

Penulis menyadari bahwa tulisan ini sangatlah jauh dari sempurna, untuk itu diharapkan saran, kritik, dan perbaikan guna pengembangan khasanah ilmu pengetahuan dan teknologi.

Semarang, Juni 2004

Penulis

ABSTRAK.

Penelitian yang telah dilakukan adalah membahas mengenai studi penyebaran sedimen tersuspensi di perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang dengan menggunakan model numerik dispersi sedimen tersuspensi di perairan pantai. Model numerik dispersi sedimen tersuspensi di perairan pantai ini dibangun dari persamaan transpor 2-dimensi horizontal QUICKEST yang digabungkan dengan model hidrodinamika semi implisit dua langkah. Skenario untuk menjalankan model dilaksanakan secara simulasi dari arus pasang surut dengan nilai seragam. Nilai awal konsentrasi sedimen tersuspensi (initial value) tersuspensi ditentukan dari hasil pengamatan lapangan yaitu pada muara sungai (Stasiun S1), yang dianggap sebagai titik sumber sedimen tersuspensi. Pengamatan di lapangan dilakukan pada 17 stasiun yang dimulai dari muara sungai (S1) menuju lepas pantai (S2 sampai dengan S17).

Pola sebaran sedimen tersuspensi yang diperoleh dari pengamatan lapangan dan berdasarkan hasil model menunjukkan bahwa konsentrasi sedimen tersuspensi konsentrasinya semakin mengecil menuju ke arah lepas pantai, konsentrasi maksimum berada disekitar sumber (muara sungai).

Konsentrasi maksimum dijumpai disekitar mulut sungai (sumber) dari sistem aliran sungai Banjir Kanal Timur Semarang, konsentrasi sebesar 2,652 gr/l yang diperoleh dari hasil pengamatan laboratorium dan simulasi model 0,6457 gr/l, sedangkan konsentrasi minimum berada pada stasiun di lepas pantai dengan nilai dari hasil pengamatan 0,3646 gr/l dan yang dihasilkan dari simulasi model numerik dispersi sedimen tersuspensi di perairan pantai.

Dari hasil penelitian diharapkan model ini bisa bermanfaat bagi pihak yang berkepentingan untuk penanganan sedimen di perairan Banjir kanal timur Semarang, dengan rekomendasi meminimalkan transport sedimen dari sistem sungai yang ada.

Kata Kunci: Arus pasang surut, Tinggi muka air, Transport sedimen tersuspensi.

ABSTRACT

This research discusses the suspended sediment distribution on the coastal water of the East Flood way Semarang. These distribution of the suspended sediment are discussed in relation to their transportation by the hidrodinamical modelling within this research area.

The numerical distribution of the suspended sediment on these coastal regions was built up by consolidation method on the horizontal 2 dimension transport QUICKEST equation and the two step semi – implicit hidrodinamically modelling.

Scenario to run this model was done by simulation of the initial uniform value of the tidal currents. The initial value of the suspended concentrarion was determined from the field observation at the river mouth (S1) wich was considered as a source . The stations of the field observation were located at mount of 17 location ,with started from the river mouth (S1) toward the offshore (from S2 until S17).

The distribution pattern of the suspended sediment concentration resulted both from field observation and simulation modelling,to diverse to the offshore direction.The maximum concentration was founded at the river mouth (resource) of the East Flood way system,the value were 1,2652 gr/l and 0,6547 gr/l which were obtained from laboratory observation and model simulation respectively, The minimum concentration were 0,3646 gr/l, and 0,4987 gr/l which were obtained from laboratory observation and model respectively.

It is expected that the research can be concluded that the numerical model dispertion sediment of the coastal water of the East Flood way Semarang. The related intitution may use this model to overcome the problem of sedimentation around the east floody way mouth.

Key Word : Tidal currents, water surface elevation, Transport sediment.

DAFTAR ISI

| | Halaman. |
|---|----------|
| LEMBAR PENGESAHAN | i |
| KATA PENGANTAR | iii |
| ABSTRAK | v |
| ABSTRACT | vi |
| DAFTAR ISI | vii |
| DAFTAR TABEL | x |
| DAFTAR GAMBAR | xi |
| DAFTAR SIMBOL | xvi |
| | |
| BAB I PENDAHULUAN | |
| 1.1. Latar Belakang | 1 |
| 1.2. Tujuan Penelitian | 2 |
| 1.3. Manfaat Penelitian | 2 |
| 1.4. Sasaran | 2 |
| | |
| BAB II. GAMBARAN UMUM WILAYAH PENELITIAN | |
| 2.1. Lokasi Penelitian | 3 |
| 2.2. Alat Penelitian | 5 |
| 2.3. Kondisi Badan Air. | 5 |
| 2.3.1. Banjir Kanal Timur. | 5 |
| 2.3.2. Kali Tenggang. | 6 |
| 2.3.3. Sungai Tambak Lorok. | 6 |
| 2.4. Parameter Lingkungan Perairan Pantai Banjir Kanal Timur. | 7 |
| 2.4.1. Suhu | 7 |
| 2.4.2. salinitas | 7 |
| 2.4.3. Total padatan tersuspensi. | 7 |
| 2.5. Hidro - Oceanografi Perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang | 9 |
| 2.5.1. Batimetri | 9 |

| | |
|-------------------|----|
| 2.5.3. Arus. | 10 |
| 2.5.3. Gelombang. | 10 |

BAB III TINJAUAN PUSTAKA

| | |
|--|----|
| 3.1. Sifat-Sifat Morfologi Estuari | 12 |
| 3.2. Sirkulasi Aliran di Estuari | 13 |
| 3.3. Proses di Perairan Estuari | 14 |
| 2.3.1. Debit Sungai dan Gradien Densitas | 14 |
| 2.3.2. Parameter Hidro-Oseanografi | 14 |
| 3.4. Sedimen dan Permasalahannya | 16 |
| 2.4.1. Sifat-sifat sedimen Pada Estuari | 16 |
| 3.5. Metode Numeris | 21 |
| 3.6. Penelitian yang telah dilakukan | 31 |
| 3.6.1. Bambang Triatmojo (1988) | 31 |
| 3.6.2. Pitara, SWL (1987) | 33 |
| 3.6.3. Mulyani (1990) | 35 |
| 3.6.4. Setiadi (1998) | 36 |

BAB IV. METODOLOGI PENELITIAN

| | |
|---|----|
| 4.1. Umum. | 37 |
| 4.2. Pendekatan Masalah & Metode Pemecahannya | 37 |
| 4.3. Metodologi. | 39 |
| 4.3.1. Pengambilan Data | 39 |
| 4.3.2. Penyelesaian Numerik | 42 |
| 4.3.3. Desain Model | 50 |
| 4.3.4. Skenario Simulasi | 51 |
| 4.3.5. Syarat Batas | 52 |
| 4.3.6. Data Masukan Sumber | 53 |
| 4.3.7. Verifikasi Model | 53 |

BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN.

| | |
|---------------------------------|----|
| 5.1. Hasil Pengamatan lapangan. | 55 |
|---------------------------------|----|

| | |
|---|----|
| 5.2. Verifikasi Elevasi Muka Air | 56 |
| 5.3. Verifikasi Arus Pasang Surut . | 56 |
| 5.4. Model Dispersi Sedimen Tersuspensi 2 dimensi | 58 |
| 5.5. Hasil Simulasi Konsentrasi Sedimen Terhadap waktu dengan Nilai Seragam | 61 |
| 5.6. verifikasi Konsentrasi sedimen tersuspensi | 65 |

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN.

| | |
|-----------------|----|
| 6.1. Kesimpulan | 69 |
| 6.2. Saran. | 69 |

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

| No | Judul | Halaman |
|-------------|---|---------|
| Tabel 2.1. | Alat yang digunakan dalam penelitian | 5 |
| Tabel 2.2. | Konsentrasi Rata-Rata Parameter Pencemar | 7 |
| Tabel 3.1a. | Komponen Pasut di Stasiun Kendal (Trismadi, 1998) | 15 |
| Tabel 3.1b. | Komponen Pasut di Stasiun Tambak Lorok (Trismadi, 1998) | 15 |
| Tabel 3.1c. | Komponen Pasut di Stasiun Demak (Trismadi, 1998) | 15 |
| Tabel 5.1. | Konsentrasi sedimen tersuspensi hasil pengamatan dan hasil simulasi modelk | 55 |
| Tabel 5.2. | Hasil Simulasi Model Pola Arus Pasang Surut di Lokasi Penelitian | 57 |
| Tabel 5.3. | Perbandingan Nilai Prosentase Kesalahan Relatif (RE) Hasil Verifikasi Model Konsentrasi Sedimen Tersuspensi | 68 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|--------------|--|----|
| Gambar 2.1. | Lokasi Penelitian | 3 |
| Gambar 2.2. | Sketsa Lokasi Penelitian | 4 |
| Gambar 3.1. | Prisma Pasang Surut | 19 |
| Gambar 3.2. | Fungsi dengan Kesalahan Order | 23 |
| Gambar 3.3. | Pendekatan beda pusat, maju dan beda mundur | 25 |
| Gambar 3.4. | Grid/kisi/jaringan titik simpul | 26 |
| Gambar 3.5 | Grid/kisi/jaringan titik simpul dari skema eksplisit | 27 |
| Gambar 3.6. | Grid/kisi/jaringan titik simpul dari skema implisit | 28 |
| Gambar 3.7. | Skema jaringan titik simpul Crank-Nicholson | 29 |
| Gambar 4.1. | Diagram alir Penelitian | 38 |
| Gambar 4.2. | Sketsa Lokasi Penelitian | 41 |
| Gambar 4.3.. | Kasa Richardson dalam dimensi bidang X,Y dan waktu | 43 |
| Gambar 4.4. | Skema kasa Richardson 2 dimensi | 45 |
| Gambar 4.5. | Sketsa Model Besar dan daerah Cuplikan Model Kecil | 50 |
| Gambar 4.6. | Sketsa model kecil Domain dan Initial Condition. | 51 |
| Gambar 5.1. | Hasil Simulasi Model Dispersi Konsentrasi sedimen Tersuspensi Saat Pasang Tertinggi Perbani (PPN) | 58 |
| Gambar 5.2. | Hasil Simulasi Model Pola Penyebaran Konsentrasi Sedimen Tersuspensi Saat Pasang Menuju Surut Perbani (PSN). | 59 |
| Gambar 5.3. | Hasil Simulasi Model Pola Penyebaran Konsentrasi Sedimen Tersuspensi Saat Surut Terendah Perbani (SSN). | 60 |
| Gambar 5.4. | Hasil Simulasi Model Pola Penyebaran Konsentrasi Sedimen Tersuspensi Saat Surut Menuju Pasang Perbani (SPN) | 61 |
| Gambar 5.5. | Hasil simulasi konsentrasi sedimen tersuspensi terhadap waktu di stasiun S2,S6,S10 dan S14 | 62 |

| | | |
|---------------|--|------------|
| | dengan Nilai awal seragam | |
| Gambar 5.6. | Hasil simulasi konsentrasi sedimen tersuspensi terhadap waktu di stasiun S7,S7,S11 dan S15 dengan Nilai awal seragam | 63 |
| Gambar 5.7. | Hasil simulasi konsentrasi sedimen tersuspensi terhadap waktu di stasiun S4,S8,S12 dan S16 dengan Nilai awal seragam | 63 |
| Gambar 5.8. | Hasil simulasi konsentrasi sedimen tersuspensi terhadap waktu di stasiun S5,S9,S13 dan S17 dengan Nilai awal seragam | 64 |
| Gambar 5.9. | Verifikasi Sedimen tersuspensi simulasi 15 hari arus pasang surut dengan nilai seragam dalam satu alur S1 ke S14. | 65 |
| Gambar 5.10. | Verifikasi Sedimen tersuspensi simulasi 15 hari arus pasang surut dengan nilai seragam dalam satu alur S1 ke S15. | 66 |
| Gambar 5.11. | Verifikasi Sedimen tersuspensi simulasi 15 hari arus pasang surut dengan nilai seragam dalam satu alur S1 ke S16. | 66 |
| Gambar 5.12 | Verifikasi Sedimen tersuspensi simulasi 15 hari arus pasang surut dengan nilai seragam dalam satu alur S1 ke S17. | 67 |
| Gambar 5.13. | Grafik perbandingan kesalahan relatif (%) hasil verifikasi model | 68 |
| Gambar L- A1 | Sketsa daerah penelitian di perairan pantai banjir Kanal Timur Semarang. | Lampiran A |
| Gambar L- A2. | Peta Batimetri Daerah Penelitian di Perairan Pantai Banjir Kanal Timur, Semarang (Hasil Survey Tim URGE BATCH III). | Lampiran A |
| Gambar L- A3. | Posisi stasiun Pengamatan Pada Grid Perhitungan | Lampiran A |
| Gambar L- B1. | Grafik Ramalan Elevasi Permukaan Air Kendal dan Demak Sebagai Syarat Batas Model Besar | Lampiran B |

| | | |
|----------------|--|------------|
| Gambar L- B2. | Grafik Ramalan Elevasi Permukaan Air Tambak Lorok Semarang | Lampiran B |
| Gambar L- B3. | Grafik Verifikasi Elevasi Permukaan Air di Tambak Lorok Semarang Pada Simulasi Model Kecil dengan Data Ramalan Pasut | Lampiran B |
| Gambar L-B4. | Grafik Verifikasi Elevasi Permukaan Air di Tambak Lorok Semarang Pada Simulasi Model Kecil dengan Data Observasi | Lampiran B |
| Gambar L- B5. | Grafik Verifikasi Komponen Kecepatan Arah V Arus Pasut Stasiun C1 Pantai Banjir Kanal Timur Semarang Pada Simulasi Model Kecil | Lampiran B |
| Gambar L- B6. | Grafik Verifikasi Komponen Kecepatan Arah U Arus Pasut Stasiun C1 Pantai Banjir Kanal Timur Semarang Pada Simulasi Model Kecil | Lampiran B |
| Gambar L- B7. | Grafik Perbedaan Ramalan Elevasi Permukaan Air pada saat Waktu Cuplik Perbani | Lampiran B |
| Gambar L- B8. | Grafik Perbedaan Ramalan Elevasi Permukaan Air pada saat Waktu Cuplik Purnama | Lampiran B |
| Gambar L- B9. | Pola Arus Pasang Surut Rata-Rata Perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang Saat Pasang Tertinggi Perbani (Model Besar) | Lampiran B |
| Gambar L- B10. | Pola Arus Pasang Surut Rata-Rata Perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang Saat Pasang Menuju Surut Perbani (Model Besar) | Lampiran B |
| GambarL- B11. | Pola Arus Pasang Surut Rata-Rata Perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang Saat Surut Terendah Perbani (Model Besar) | Lampiran B |
| Gambar L- B12. | Pola Arus Pasang Surut Rata-Rata Perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang Saat Surut Menuju Pasang Perbani (Model Besar) | Lampiran B |
| Gambar L- B13. | Pola Arus Pasang Surut Rata-Rata Perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang Saat Pasang Tertinggi Purnama (Model Besar) | Lampiran B |

- Gambar L- B14. Pola Arus Pasang Surut Rata-Rata Perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang Saat Pasang Menuju Surut Purnama (Model Besar) Lampiran B
- Gambar L- B15. Pola Arus Pasang Surut Rata-Rata Perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang Saat Surut Terendah Purnama (Model Besar) Lampiran B
- Gambar L- B16. Pola Arus Pasang Surut Rata-Rata Perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang Saat Surut Menuju Pasang Purnama (Model Besar) Lampiran B
- Gambar L- B17. Pola Arus Pasang Surut Rata-Rata Perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang Saat Pasang Tertinggi Perbani (Model Kecil) Lampiran B
- Gambar L- B18. Pola Arus Pasang Surut Rata-Rata Perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang Saat Pasang Menuju Surut Perbani (Model Kecil) Lampiran B
- Gambar L- B19. Pola Arus Pasang Surut Rata-Rata Perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang Saat Surut Terendah Perbani (Model Kecil) Lampiran B
- Gambar L- B20. Pola Arus Pasang Surut Rata-Rata Perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang Saat Surut Menuju Pasang Perbani (Model Kecil) Lampiran B
- Gambar L- B21. Pola Arus Pasang Surut Rata-Rata Perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang Saat Pasang Tertinggi Purnama (Model Kecil) Lampiran B
- Gambar L- B22. Pola Arus Pasang Surut Rata-Rata Perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang Saat Pasang Menuju Surut Purnama (Model Kecil) Lampiran B
- Gambar L- B23. Pola Arus Pasang Surut Rata-Rata Perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang Saat Surut Terendah Purnama (Model Kecil) Lampiran B
- Gambar L- B24. Pola Arus Pasang Surut Rata-Rata Perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang Saat Surut Menuju Pasang Purnama (Model Kecil) Lampiran B

DAFTAR SIMBOL

- A_h = viskositas eddy horizontal ($m^2/detik$)
 CFL = Kriteria stabilitas- Courant Friedreich- Lewy
 d = Rata -rata kedalaman tak terganggu
 f = Parameter Coriolis = $2\Omega \sin \phi$
 g = Percepatan gravitasi ($9.8 m/detik^2$)
 H = Kedalaman aktual = $d + \zeta$ (m)
 H_{max} = Kedalaman maksimal perairan (m)
 $H(u)$ = Nilai perataan kedalaman di titik U (m)
 $H(v)$ = Nilai perataan kedalaman di titik V (m)
 $RF(u)$ = Fungsi gesekan dasar di titik U
 $RF(v)$ = Fungsi gesekan dasar di titik V
 r = Koefisien gesekan dasar
 t = Parameter waktu (detik)
 u = Kecepatan arus arah sumbu x ($m/detik$)
 U = Transpor dalam arah sumbu y = $\int_{-h}^{\zeta} u dz$ ($m^2/detik$)
 v = Kecepatan dalam arah sumbu y ($m/detik$)
 V = Transpor dalam arah sumbu Y = $\int_{-h}^{\zeta} v dz$ ($m^2/detik$)
 x = Sumbu koordinat mendatar arah Barat-Timur
 y = Sumbu koordinat mendatar arah Selatan-Utara
 Ω = Kecepatan sudut rotasi bumi ($rad/detik$)
 Δt = Langkah waktu simulasi
 Δt_{CFL} = Langkah waktu simulasi yang dibatasi oleh kriteria stabilitas Courant-Friedrich-Lewy (CFL)
 Δx = Lebar sel/grid arah sumbu x
 Δy = Lebar sel/grid arah sumbu y
 ε = Nilai konvergensi absout dalam itersi SOR

- ϕ = Lintang posisi yang ditinjau
 λ = Koefisien gesekan angin
 ρ = densitas air (g/m^3)
 σ = Frekuensi komponen harmonik pasang surut (s^{-1})
 τ^x = Komponen tegangan gesekan dua medium yang berbeda karakteristiknya arah sumbu x (Nm^2)
 τ^y = Komponen tegangan gesekan dua medium yang berbeda karakteristiknya arah sumbu y (Nm^2)
 τ_b^x = Komponen tegangan gesekan dasar (gaya disipasi) arah sumbu x (Nm^2)
 τ_b^y = Komponen tegangan gesekan dasar (gaya disipasi) arah sumbu y (Nm^2)
 τ_s^x = Komponen tegangan permukaan arah sumbu x (Nm^2)
 τ_s^y = Komponen tegangan permukaan arah sumbu y (Nm^2)
 ζ = Elevasi muka air laut terhadap garis rata-rata kedalaman (m)
- D_x = Koefisien difusi arah $-x$
 D_y = Koefisien difusi arah $-y$
 C = Konsentrasi Sedimen Tersuspensi
- A = Lebar penampang basah
 a_c = Percepatan Coriolis
 A_0 = Luas penampang aliran pada mulut estuari/muara
 A_x = Luas penampang aliran pada jarak x km dari mulut estuari/muara
 b = Lebar estuari
 b_0 = Lebar mulut estuari
 b_x = Lebar pada x km dari mulut estuari
 C = Konsentrasi garam

- C_a = Konsentrasi awal hitungan
- C_0 = Konsentrasi awal hitungan cara analistis
- C_B = Konsentrasi garam pada proses konveksi
- C_C = Konsentrasi garam pada proses dispersi (konveksi + difusi)
- E = angka estuari
- F_r = angka froude
- h = Kedalaman rata-rata pada mulut estuari dalam meter
- K_x = Koefisien difusi turbulen arah memanjang
- K_z = Koefisien difusi turbulen arah vertikal
- Q = Debit aliran
- S_d = Fluk pengendapan
- U^* = Kecepatan geser
- W = Kecepatan vertikal
- W_s = Kecepatan endap sedimen suspensi
- α = angka air pasang
- β = Perbedaan antara difusi oleh partikel sedimen dan difusi dari partikel air.
- ρ = Rapat masa air
- ε_z = koefisien viskositas turbulen.
- ϕ = Pengurangan konstante Vorkarman yang mempunyai harga yang mempunyai harga kurang dari 0,4.
- τ_0 = Tegangan tarik
- τ_b = Tegangan tarik pada dasa
- τ_{ce} = Tegangan kritik endap

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Salah satu fenomena Fisis dan dinamis yang selalu dijumpai di estuari adalah gerak naik turunnya permukaan air yang bersifat periodik yang diakibatkan oleh gelombang pasang surut dan debit aliran dari alur sungai yang bermuara di estuari tersebut. Kenaikan muka air laut pada saat pasang akan mengakibatkan masuknya sebagian air laut tersebut ke dalam alur sungai sejauh jarak tertentu dari hilir demikian juga sebaliknya penurunan muka air pada saat surut akan mengakibatkan masuknya sebagian air sungai ke laut. Sebagian alur sungai yang masih dipengaruhi oleh pasang surut ini biasa disebut dengan estuari. Estuari merupakan daerah pantai yang berhubungan langsung dengan laut, pada daerah ini air laut tercampur dengan air tawar yang berasal dari sungai dan daratan.

Berbagai aktivitas manusia dalam bidang kelautan, pertanian, dan bahkan industri akhir-akhir ini banyak dilakukan di kawasan pantai sehingga apabila tidak terkendali, aktivitas ini secara ekologis dapat menyebabkan berbagai kerusakan sumberdaya alam dan lingkungan yang akan berakibat terhadap penurunan kualitas lingkungan di kawasan pantai. Kegiatan tersebut masing-masing mendatangkan manfaat yang berbeda ditinjau dari aspek ekonomi.

Demikian pula dampaknya terhadap lingkungan akan berbeda-beda sesuai dengan masukan yang diberikan. Beberapa tahun terakhir ini studi mengenai prediksi / peramalan sirkulasi di estuari berkembang pesat. Pengamatan dan penelitian studi estuari yang berhubungan dengan sirkulasi di estuari pada umumnya berkaitan dengan pengetahuan mengenai pencampuran (mixing) air tawar dan air laut, penjalaran gelombang pasang surut, fenomena aliran dan gerak sedimen. Sirkulasi aliran di estuari tersebut dapat diprediksi dengan menggunakan model fisik dan model matematik.

Sebagai kajian Studi dari hal tersebut diatas yang akan dikaji adalah Perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang yang merupakan daerah muara dari sistem sungai Banjir Kanal Timur, Tambak Lorok, dan Tenggang yang berfungsi

sebagai pelabuhan, daerah rekreasi, perikanan, tambak, pembuangan limbah, dan pembangkit listrik tenaga uap. Kandungan air sungai yang masuk ke perairan pantai ini diperkirakan mengandung limbah domestik dan limbah industri yang terbawa oleh keberadaan sungai-sungai tersebut dari daerah sebelah hulu muara yang melalui pusat kota Semarang dalam bentuk sedimen tersuspensi.

1.2. Tujuan Penelitian.

Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui dispersi sedimen tersuspensi akibat pasang surut perairan pantai.

1.3. Manfaat Penelitian.

Hasil penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai dasar dalam pengembangan model penyebaran sedimen tersuspensi pada perairan pantai sehingga dapat dimanfaatkan sebagai informasi untuk menyusun strategi pengelolaan dan pemantauan lingkungan yang terintegrasi di perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang.

1.5. Sasaran.

Sasaran dari penelitian ini adalah untuk mengetahui sejauh mana dispersi sedimen tersuspensi dalam suatu domain pada perairan pantai akibat pengaruh arus pasang surut dari laut.

BAB II

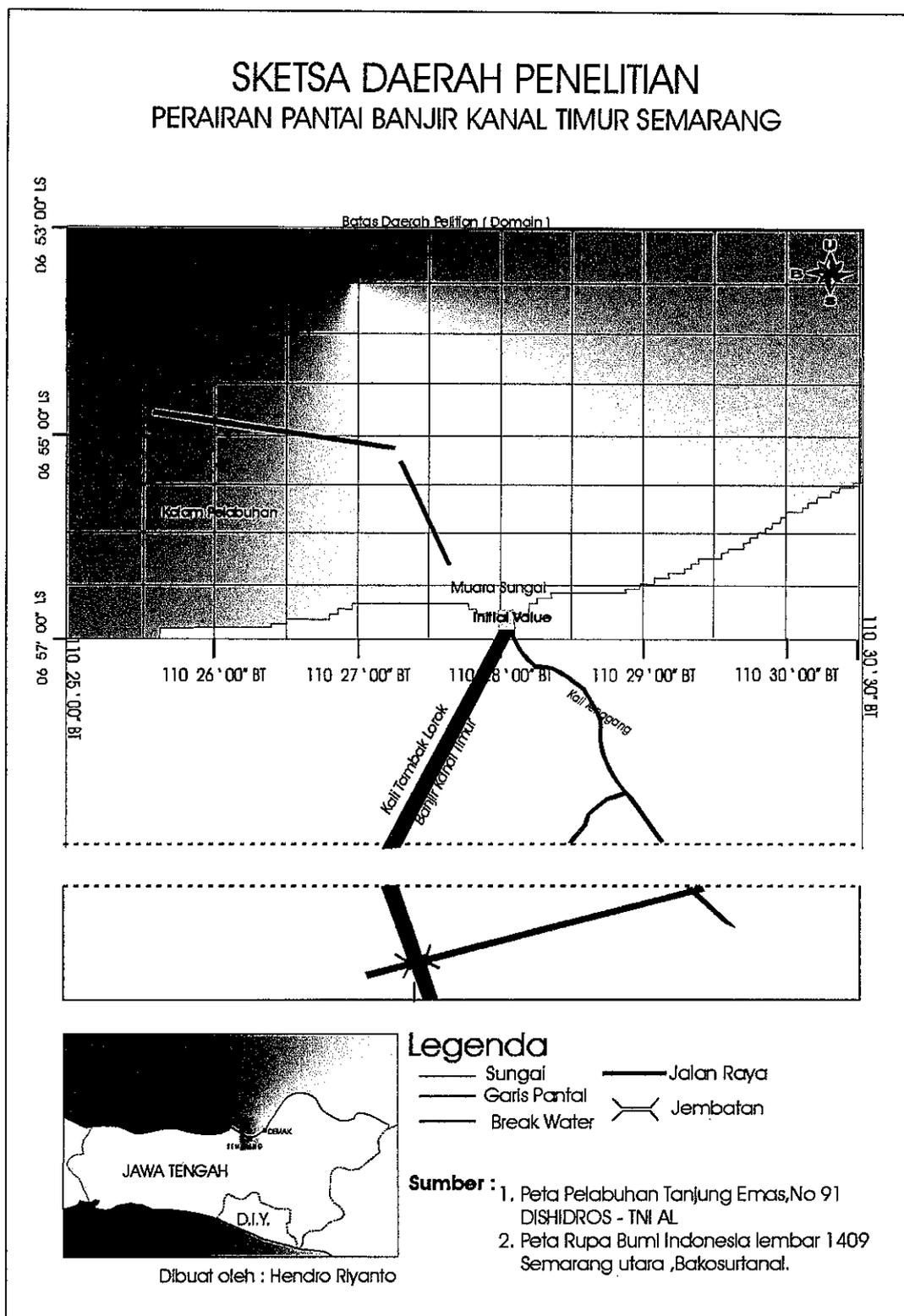
GAMBARAN UMUM WILAYAH PENELITIAN.

2.1.Lokasi Penelitian.

Lokasi penelitian untuk pengembangan model penyebaran sedimen kohesif pada estuari ini dilakukan di Perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang, yang berada di sebelah timur Pelabuhan Tanjung Emas Semarang. Perairan pantai Banjir Kanal Timur ini merupakan daerah muara dari sistem sungai Banjir Kanal Timur, Tambak Lorok, dan Kali Tenggang. Sungai Banjir Kanal Timur sendiri melintasi kota Semarang bagian timur yang merupakan kawasan permukiman dan industri. Batas daerah penelitian adalah $6^{\circ}53'40'' - 6^{\circ}57'00''$ S dan $110^{\circ}25'00'' - 110^{\circ}30'30''$ T. Lokasi penelitian terlihat pada Gambar 2.1 ,Gambar 2.2.dan Gambar L-A1.



Gambar 2.1. Lokasi Penelitian



Gambar .2.2. Sketsa Lokasi Penelitian

2.2. Alat Penelitian.

Tabel 2.1. Alat yang digunakan dalam penelitian

| Peralatan Lapangan | | |
|-------------------------|----------------------------|----------------------------|
| N0 | Alat | Kegunaan |
| 1 | Tongkat berskala | Mengukur kedalaman |
| 2 | Bola Duga | Mengukur kecepatan arus |
| 3 | Stop watch | Menghitung waktu tempuh |
| 4 | Kompas | Mengetahui arah mata angin |
| 5 | GPS Garmin 410 | Menentukan koordinat |
| 6 | Nansen bottle | Mengambil sampel air |
| 7 | Botol sampel | Tempat sampel MPT |
| Peralatan Laboratorium. | | |
| 1 | Oven | Mengeringkan sedimen |
| 2 | Timbangan Analitik | Menimbang Samplel |
| 3 | Kertas saring Ashles no 42 | Menyaring sampel air |
| 4 | Vacum pump | Menyedot air |
| 5 | Gelas ukur | Menampung air |
| 6 | Desikator | Menyimpan sampel |

2.3. Kondisi Badan Air.

2.3.1. Banjir Kanal Timur.

Sungai Banjir Kanal Timur memiliki panjang sekitar 14,25 km dengan kemiringan sekitar 0,00018 dengan debit sungai rata-rata adalah 295,33 liter/dt. Daerah alirannya mengalir sepanjang kawasan industri, kondisi kualitas airnya disepanjang alirannya diharapkan dapat dipergunakan bagi keperluan industri atau digolongkan ke dalam golongan-D. Tetapi pada kenyataannya kondisi sungai tersebut pada saat-saat tertentu ternyata tidak memenuhi persyaratan, untuk memenuhi keperluan industri khususnya pada saat musim penghujan . Pada saat tersebut terdapat beberapa parameter pencemar yang larut dalam air yang melebihi ambang batas baku mutu golongan-D, diantaranya adalah kadmium (Supputra, 1993). Namun demikian parameter lainnya seperti

ammonia, nitrit, dan nitrat rata-rata dari tahun 1988 – 1996 terlihat belum melampaui nilai secara alamiah.

2.3.2. Kali Tenggara.

Kali Tenggara memiliki panjang sekitar 5,20 km dengan kemiringan sekitar 0,00058 dan debit sungai rata-rata adalah 8,900 liter/dt. Sebagai sungai yang mengalir di kawasan industri, kondisi airnya paling tidak harus dapat dipergunakan bagi keperluan industri atau digolongkan ke dalam golongan-D. Kondisi sungai tersebut pada saat-saat tertentu ternyata tidak memenuhi persyaratan, khususnya pada saat musim penghujan dimana terdapat beberapa parameter pencemar yang melebihi ambang batas baku mutu golongan-D, diantaranya adalah suhu, padatan terlarut, dan air raksa (Supputra, 1993). Namun demikian parameter lainnya seperti ammonia, nitrit, dan nitrat rata-rata dari tahun 1988 – 1996 terlihat belum melampaui nilai secara alamiah. Selanjutnya kondisi konsentrasi rata-rata parameter pencemar dalam badan air tersaji pada Tabel 2.2.

2.3.3. Kali Banger (Tambak Lorok).

Kali Banger /Tambak Lorok memiliki panjang sekitar 6,50 km dengan kemiringan sekitar 0,00046 dan debit sungai rata-rata adalah 7,000 liter/dt. Sebagai sungai yang mengalir melalui perkotaan, kondisi airnya paling tidak harus dapat dipergunakan bagi keperluan usaha perkotaan atau digolongkan ke dalam golongan-D. Kondisi sungai tersebut pada saat-saat tertentu ternyata tidak memenuhi persyaratan, khususnya pada saat musim penghujan dimana terdapat beberapa parameter pencemar yang melebihi ambang batas baku mutu golongan-D, diantaranya adalah air raksa (Supputra, 1993).

Berbeda dengan kondisi kedua sungai tersebut diatas, parameter lainnya seperti ammonia telah melebihi baku mutu yang diperbolehkan yaitu 1,1542 mg/l. Sedangkan untuk nitrit dan nitrat rata-rata dari tahun 1988 – 1996 terlihat belum melampaui nilai secara alamiah. Selanjutnya kondisi konsentrasi rata-rata parameter pencemar dalam badan air tersaji pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Konsentrasi rata-rata parameter pencemar.

| No | Nama Sungai | Suhu °C | TDS mg/l | Cd mg/l | NH ₃ -N mg/l | NO ₂ -N mg/l | NO ₃ -N mg/l | DO mg/l | BOD mg/l | COD mg/l | Hg mg/l |
|----|--------------------|---------|----------|---------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------|----------|----------|---------|
| 1 | Banjir Kanal Timur | 28,1 | 623, | 0,12 | 0,058 | 0,016 | 0,233 | 2,517 | 13,383 | 91,05 | - |
| 2 | K. Tengg ang | 31,6 | 3.924 | 0,003 | 0,143 | 0,049 | 0,022 | 1,845 | 13,682 | 186,56 | 2,67 |
| 3 | T. Lorok | 30,1 | 797,7 | 0,022 | 1,154 | 0,018 | 0,049 | 1,595 | 32,766 | 124,19 | 0,00 |

Sumber : Supputra,T (1993)

2.4. Parameter Lingkungan Perairan Pantai Banjir Kanal Timur.

2.4.1. Suhu.

Suhu pada perairan Pantai Banjir Kanal Timur pada umumnya berkisar antara 27,4 – 30,9 °C pada musim kemarau dan berkisar 28,2 – 33,1 °C pada musim penghujan. Kisaran suhu ini terlihat masih dalam kisaran alamiah untuk daerah perairan pantai. Namun tingginya suhu yang mencapai 33,1 °C dimungkinkan karena daerah penelitian berada dekat dengan area outlet air pendingin PLTGU Tambak Lorok , dimana didaerah outlet tersebut mempunyai temperatur yang cukup tinggi sehingga mempengaruhi keadaan temperatur daerah sekitarnya.

2.4.2. Salinitas.

Salinitas yang terdapat pada perairan Pantai Banjir Kanal Timur sangat di pengaruhi oleh masukan debit air tawar dari sistem sungai Banjir Kanal Timur, Kali Tengg ang, dan Tambak Lorok, yang bermuara di perairan pantai tersebut. Selain itu terdapat pula pengaruh pasang surut dan penguapan yang terjadi. Adanya masukan air tawar dari sistem sungai tersebut akan menyebabkan bergesernya garis *isohaline* ke arah hilir pada saat surut.

Isohaline merupakan garis yang menghubungkan area dengan nilai salinitas yang sama. Sedangkan pada saat laut sedang dalam keadaan pasang, massa air dari laut akan terbawa ke arah muara sungai sehingga garis *Isohaline* bergeser ke arah hulu. Selain itu penguapan yang tinggi akibat intensitas

matahari pada saat kemarau akan menyebabkan massa air permukaan akan diuapkan ke atmosfer, akibatnya ion-ion yang tertinggal akan menyebabkan tingginya konsentrasi salinitas.

Dari pengamatan yang telah dilakukan sebelumnya (supputra 1993), diperoleh kisaran salinitas antara 25 – 30 ‰ di daerah sekitar muara , dan 32 – 33 ‰ di perairan laut.

2.4.3. Total Padatan Tersuspensi

Terjadinya padatan tersuspensi biasanya dipengaruhi oleh banyaknya partikel-partikel yang berada di perairan. Partikel-partikel ini dapat berasal dari limbah organik maupun transport sedimen dari ketiga sistem sungai Banjir Kanal Timur ke perairan.

Limbah organik yang terdapat pada aliran sungai tersebut dapat berasal dari limbah domestik maupun industri yang terdapat di sepanjang sistem aliran sungai. Selain hal tersebut, dengan adanya mekanisme resuspensi sepanjang aliran juga akan dapat mempengaruhi besarnya konsentrasi padatan tersuspensi. Resuspensi di perairan pantai Banjir Kanal Timur dapat disebabkan oleh pengaruh pengadukan oleh gelombang maupun adanya aktifitas masyarakat setempat untuk mencari keang dengan menggunakan garuk.

Tingginya konsentrasi padatan tersuspensi akan mempengaruhi penetrasi sinar matahari ke kolom air sehingga akan mempengaruhi proses fotosintesa di perairan, yang pada akhirnya akan berakibat konsentrasi oksigen yang terlarut akan berkurang sehingga aktifitas organisme dalam melangsungkan hidupnya akan terganggu pula. Padatan tersuspensi pada sistem aliran sungai Banjir Kanal Timur tersebut menunjukkan kisaran yang bervariasi dan berkaitan dengan nilai kekeruhan dan kecerahan perairan.

Nilai kisaran konsentrasi padatan tersuspensi di perairan pantai Banjir Kanal Timur mempunyai nilai antara 0,3 – 2,0 gr/l. Dimana nilai tertinggi padatan tersuspensi diperoleh pada daerah dekat muara sungai. Banjir Kanal timur, sedangkan padatan tersuspensi yang nilainya semakin rendah terdapat pada perairan yang menjauhi muara dan menuju ke arah laut.

Hal tersebut terjadi karena diakibatkan di daerah dekat muara terdapat suatu fenomena yang kompleks, antara lain adalah masukan limbah organik, transport sedimen, pengaruh gelombang, dan aktifitas masyarakat yang berada disekitarnya.

2.4.4. Derajat Keasaman.

Derajat keasaman (pH) menunjukkan ukuran dari ion hidrogen untuk menggambarkan keadaan perairan bersifat asam atau basa. Nilai pH sangat penting untuk diketahui berkaitan dengan reaksi biogeokimia yang terjadi pada pH tertentu dan dalam pH tertentu pula.

Pada pengamatan yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya (Tim URGE BATCH III) nilai pH perairan pantai banjir kanal Timur Semarang mempunyai kisaran antara 7,7 – 8,4 .kisaran ini masih termasuk dalam kisaran baku mutu air laut untuk biota laut yang ditentukan yaitu 6,5 – 8,5.

2.5. Hidro - Oceanografi Perairan Pantai Banjir kanal Barat.

2.5.1. Batimetri.

Morfologi dasar laut daerah penelitian secara umum adalah landai dengan kemiringan $\pm 0,26$ % di dekat pantai dan $\pm 0,23$ % di sebelah utara. Disebelah utara barat laut daerah penelitian kedalaman maksimal adalah $\pm 8,8$ meter. Pada alur masuk pelabuhan kedalaman laut berkisar $\pm 10,0$ meter dan kedalaman maksimum adalah 11,5 meter.

2.5.2. Pasang Surut.

Dari pengamatan Pasang surut yang telah dilakukan oleh Tim URGE BATCH III selama 15 piatan pada lokasi pengamatan di dekat muara sungai dengan menggunakan palem pasut yang dilevel ke BM_KTI yang terletak sdiujung jalan inspeksi Banjir Kanal Timur dengan posisi $6^{\circ} 56' 39,1''$ S dan $110^{\circ} 26' 40''$ T diperoleh bahwa tipe pasang surut adalah campuran cenderung diurnal.

2.5.3. Arus.

Komponen arus pada daerah penelitian dibedakan dua yaitu komponen arus arah x (u) dan komponen arus arah y (v). Dari hasil pengamatan dilapangan diperoleh bahwa komponen arus u (arah-x) dan v (arah-y) terlihat sangat fluktuatif, artinya hampir tidak terlihat pola pasutnya. Pada musim timur arus memiliki arah timur laut dan barat daya, sedangkan pada musim barat arus mempunyai arah barat laut – tenggara.

Arus pasang surut yang terjadi di perairan pantai Banjir Kanal Timur Semarang menunjukkan bahwa :

- a. Pada Kondisi surut menuju pasang arus bergerak dari barat atau barat laut menuju ke timur atau timur laut.
- b. Pada kondisi pasang menuju surut arus bergerak dari timur atau timur laut menuju ke barat atau barat laut.

2.5.4. Gelombang.

Gambaran umum mengenai kondisi gelombang pada perairan pantai Banjir Kanal Timur sebagai daerah penelitian dibedakan dalam dua keadaan musim diantaranya adalah sebagai berikut :

Gelombang yang terjadi pada musim timur.

Pada musim timur umumnya gelombang yang terjadi pada perairan pantai Banjir Kanal Timur adalah gelombang kecil ($H_{1/10}$ maksimum 1,2 m). Sedangkan variasi harian terlihat cukup mencolok, dimana gelombang terjadi pada sore dan malam hari dengan rata-rata $H_{1/3}$ dan $H_{1/10}$ adalah 1 meter. Periode rata-rata ($T_{1/3}$ dan $T_{1/10}$) adalah 3 detik. Hal ini disebabkan oleh adanya pengaruh angin laut yang bertiup dari laut ke darat pada malam hari. Sedangkan pada pagi hari umumnya gelombang adalah kecil, dimana tinggi $H_{1/3}$ dan $H_{1/10}$ berkisar antara 0,15 – 0,30 meter.

Gelombang yang terjadi pada musim barat.

Pada musim barat umumnya gelombang yang terjadi pada perairan pantai Banjir Kanal Timur cukup besar ($H_{1/10}$ maksimum mencapai 3,0 m). Sedangkan variasi harian tidak terlihat mencolok, dimana gelombang terjadi rata-rata $H_{1/3}$

adalah 2 meter dan $H_{1/10}$ adalah 1 meter. Periode rata-rata ($T_{1/3}$ dan $T_{1/10}$) adalah 5 detik.

2.5.5. Angin.

Kondisi angin pada daerah penelitian pada perairan pantai banjir Kanal timur pada musim timur (Juli – Agustus) menunjukkan bahwa angin didominasi oleh angin timur dengan variasi timur laut ($\pm 45^{\circ}$), timur ($\pm 90^{\circ}$), dan tenggara ($\pm 135^{\circ}$), dengan kecepatan berkisar antara 0,1 – 8 m/dt, dimana sebaran arah angin didominasi pada arah timur ($\pm 36\%$), tenggara ($\pm 22\%$), dan timur laut ($\pm 16\%$). Sedangkan kondisi angin pada musim barat (Februari – Maret) , didominasi oleh angin barat daya dengan variasi selatan ($\pm 180^{\circ}$) dan barat ($\pm 270^{\circ}$), dengan kecepatan angin berkisar antara 0,1 – 10 m/dt , dimana sebaran arah angin didominasi arah barat daya ($\pm 27\%$) dan tenggara ($\pm 22\%$) dan barat ($\pm 14\%$).

BAB III.

TINJAUAN PUSTAKA

3.1. Sifat-Sifat Morfologi Estuari

Estuari didefinisikan sebagai bagian dari sungai yang sangat dipengaruhi oleh gelombang pasang surut dengan lebar yang berubah dengan cepat sepanjang bagian sungai tersebut, di estuari air laut asin bercampur dengan air sungai (tawar). Muara yang menerima masukan debit dari ujung hulunya, pada periode pasang muara sungai tersebut juga menerima debit dari aliran yang diakibatkan oleh pasang surut, dengan asumsi jika dalam satu periode pasang surut mempunyai durasi 6 atau 12 jam (tergantung tipe pasang surut) maka pada estuari akan terkumpul masa air dalam jumlah yang sangat besar. Pada waktu periode surut dengan durasi yang hampir sama, volume air tersebut akan dikeluarkan kembali ke laut, sehingga menyebabkan terjadinya kecepatan aliran yang cukup besar. Fenomena tersebut berlangsung terus menerus, sehingga morfologi estuari akan menyesuaikan terhadap gaya-gaya hidrodinamika yang bekerja pada estuari tersebut. Sehingga tampang aliran, estuari menjadi lebih besar untuk dapat melewati debit aliran tersebut. Dengan demikian pada umumnya kedalaman dan lebar estuari menjadi lebih besar daripada daerah sebelah hulunya. Pada umumnya, lebar dan tampang estuari mengikuti hukum yang berhubungan dengan keseimbangan dinamis antara gaya-gaya hidraulis dan kemungkinan transpor material.

3.2. Sirkulasi Aliran di Estuari

Sirkulasi air di estuari merupakan aliran tidak permanen. Sirkulasi aliran pada muara biasanya dipengaruhi oleh sifat-sifat morfologis muara sungai, pasang surut dan debit aliran dari hulu sungai (debit sungai). Debit sungai dan perubahan musimannya adalah salah satu dari parameter penting dalam estuari. Pada umumnya debit sungai jauh lebih kecil daripada debit yang ditimbulkan oleh pengaruh pasang surut. Pengaruh debit aliran lebih dominan dibagian hulu estuari dibandingkan dengan disebelah hilir. Pada waktu banjir, debit sungai

mendorong sedimen kelaut ,sehingga batas kekeruhan terdorong lebih ke hilir, sedang pada debit kecil polutan bergerak kearah hulu.

Pasang surut adalah parameter yang paling penting dalam sirkulasi aliran di estuari. Fluktuasi muka air laut, karena adanya pasang surut akan sangat mempengaruhi aliran di muara. Pada waktu air pasang, air laut akan masuk ke arah hulu (sungai) dan akan bertemu dengan aliran sungai yang menuju ke laut. Kedua aliran yang berlawanan arah ini akan menyebabkan suatu tempat dimana kecepatan aliran adalah nol. Masuknya air laut ke sungai akan menghalangi aliran sungai sehingga air sungai akan terkumpul di daerah muara dan mengakibatkan garis pembendungan sampai cukup jauh di bagian hulu sungai. Pada waktu air surut, air laut dan air sungai yang terkumpul pada muara tersebut akan keluar ke laut. Mengingat volume yang terkumpul sangat besar, maka aliran yang terjadi pada waktu surut mempunyai kecepatan yang cukup besar. Disamping hal tersebut diatas arus pasang surut sangat mempengaruhi pergeseran sedimen disepanjang estuari, yang bergerak kearah hulu pada waktu air pasang dan kehilir pada waktu air surut. Pada saat titik balik (slack), yaitu disekitar air pasang tertinggi dan air surut terendah, dimana kecepatan aliran kecil, sebagian besar sedimen mengendap. Sebaliknya , disekitar setengah periode air surut dan air pasang , dimana kecepatan aliran besar, sedimen yang tadinya mengendap akan tererosi kembali. Konsentrasi dan posisi sedimen sangat tergantung pada variasi tinggi pasang surut dan debit sungai.

3.3. Proses di Perairan Estuari

3.3.1. Debit Sungai dan Gradien Densitas

Fenomena yang terjadi di perairan pantai yang langsung berhubungan dengan sungai sangat dipengaruhi oleh masukan air tawar atau debit sungai yang dapat menimbulkan adanya perbedaan (*gradien*) densitas. Interaksi air tawar dan air asin menentukan sirkulasi air dan proses pencampuran yang dibangkitkan oleh perbedaan densitas antara dua jenis air. Densitas air laut tergantung pada salinitas dan temperatur, namun di estuari kisaran salinitas sangat besar sedangkan kisaran temperatur kecil. Oleh karena itu temperatur mempunyai pengaruh yang relatif kecil terhadap densitas. Meskipun demikian

terdapat beberapa estuari dimana temperatur menjadi faktor yang dominan, misalnya beberapa estuari di daerah tropis yang mempunyai aliran sungai yang kecil selama musim kering. Pemanasan di permukaan dapat menimbulkan perbedaan densitas yang cukup besar antara estuari dan laut yang membangkitkan sirkulasi secara gravitasi (*a gravitational circulation*).

Apabila debit sungai cukup besar, maka kemungkinan akan terjadi *entrainment* yang merupakan proses pencampuran air tawar dan asin. Pada kondisi ini estuari akan terstratifikasi kuat. Sedang bila debit sungai cukup lemah dan jika penampang melintang estuari kecil, kemungkinan akan terbentuk estuari homogen secara vertikal. Jika tidak ada gradien salinitas vertikal, maka tidak ada fluks vertikal garam dan pencampuran hanya terjadi dalam arah horisontal.

3.3.2. Parameter Hidro-Oseanografi

a. Arus

Arus laut adalah gerakan massa air yang tidak periodik namun merupakan gerakan massa air yang terus menerus. Massa air laut bergerak dari suatu lokasi ke lokasi lain yang kadang-kadang sampai ke lokasi yang sangat jauh sebelum kembali ke lokasi asal (sirkulasi massa air laut).

Pasang surut merupakan fenomena alam yang dihubungkan dengan naik turunnya permukaan air laut. Fenomena pasang ini akan membangkitkan arus, yang disebut arus pasang (*tidal current*). Arus pasang merupakan pergerakan horisontal air laut yang mengikuti kondisi pasang dan gerakannya merupakan gerakan yang periodik akibat perubahan elevasi muka laut. Pada saat menuju pasang arus bergerak ke suatu arah, sementara pada saat menuju surut arus akan bergerak ke arah sebaliknya. Pada laut terbuka yang dangkal, karakteristik arus pasang memiliki variasi kecepatan yang hampir tidak pernah menuju nol, arahnya berotasi, umumnya didominasi periode semidiurnal. Arus pasang biasanya direpresentasikan dengan vektor arus hidrograf, yakni gambar vektor arus setiap jam pada satu siklus pasang.

Dari hasil pengamatan (Trismadi 1988) pasang surut yang telah dilakukan selama 15 pialan pada lokasi pengamatan yang berada di dekat muara sungai dengan menggunakan model palem pasut yang dilevel ke BM-KTI yang terletak di ujung jalan inspeksi Banjir Kanal Timur diperoleh bahwa tipe pasut adalah campuran cenderung diurnal. Selain itu dilakukan pula pengamatan pasang surut di daerah Tanjung Korowelang - Kendal dan Moro Demak – Demak. Hasil selengkapnya komponen-komponen pasut dapat terlihat pada Tabel 3.1 a – Tabel 3.1c.

Tabel 3.1a.Komponen Pasut di Stasiun Kendal.

| | S ₀ | M ₂ | S ₂ | N ₂ | K ₂ | K ₁ | O ₁ | P ₁ | M ₄ | MS ₄ |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| A (cm) | 84,8 | 10,2 | 4,7 | 2,3 | 1,1 | 16,7 | 8,0 | 5,5 | 0,5 | 0,4 |
| g (°) | | 261 | 173 | 190 | 173 | 339 | 221 | 339 | 163 | 10 |

Sumber : Trismadi (1998)

Tabel 3.1b.Komponen Pasut di Stasiun Tambak Lorok.

| | S ₀ | M ₂ | S ₂ | N ₂ | K ₂ | K ₁ | O ₁ | P ₁ | M ₄ | MS ₄ |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| A (cm) | 194,8 | 12,7 | 6,0 | 4,9 | 1,4 | 22,9 | 11,5 | 7,6 | 0,1 | 0,4 |
| g (°) | | 250 | 150 | 184 | 150 | 335 | 213 | 335 | 111 | 56 |

Sumber : Trismadi (1998)

Tabel 3.1c..Komponen Pasut di Stasiun Demak.

| | S ₀ | M ₂ | S ₂ | N ₂ | K ₂ | K ₁ | O ₁ | P ₁ | M ₄ | MS ₄ |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| A (cm) | 43,1 | 11,7 | 6,2 | 3,7 | 1,4 | 22,4 | 8,6 | 7,4 | 0,3 | 0,4 |
| g (°) | | 225 | 146 | 185 | 146 | 336 | 227 | 336 | 180 | 272 |

Sumber : Trismadi (1998)

b. Gelombang

Secara umum dapat dikatakan bahwa gelombang laut ditimbulkan karena angin, meskipun gelombang dapat pula disebabkan oleh bermacam-macam sebab, misalnya letusan gempa di dasar laut, tsunami, dan lain-lain.

Di perairan dalam efek dasar tidak berpengaruh terhadap gerakan air. Sedangkan di perairan dangkal, transformasi gelombang dipengaruhi oleh kemiringan dasar, kekasaran dasar, butiran pasir dan material lainnya yang ada di dasar. Proses transformasi ini berupa pendangkalan dan refraksi gelombang.

Namun bila terdapat bangunan pantai sebagai penghalang maka dalam transformasi gelombang terjadi proses difraksi dan refraksi.

Gelombang yang merambat memasuki perairan dangkal akan mengalami perubahan profil atau karakteristik gelombang akibat perubahan kedalaman perairan. Apabila gelombang membentuk sudut dengan garis pantai, maka komponen transport akan terjadi di sepanjang pantai dan biasa disebut *longshore current*.

c. Angin

Salah satu faktor penggerak timbulnya arus laut adalah angin. Dimana jika angin bertiup di atas permukaan suatu perairan, maka partikel-partikel air yang ada di bawahnya akan ikut terseret, dan gerakan ini selanjutnya akan diteruskan pada partikel-partikel air yang lebih bawah. Pada permukaan air yang langsung bersentuhan dengan angin, maka arus yang ditimbulkan akan bergerak tidak searah dengan arah pergerakan anginnya, namun akan dibelokkan sekitar 45° . Untuk belahan bumi utara pembelokan arah ke sebelah kanan, sedangkan untuk belahan bumi selatan akan dibelokkan ke kiri.

Selain arus, fenomena lain yang dipengaruhi oleh adanya angin adalah gelombang. Gelombang laut yang dibangkitkan oleh angin dihasilkan dari fluks momentum dan energi udara di atas medan gelombang. Kebanyakan teori pertumbuhan gelombang memandang masukan energi dan momentum ini tergantung pada tekanan permukaan yang sangat bergantung pada kecepatan angin dan faktor lain di atas medan gelombang.

3.4.Sedimen dan Permasalahannya

3.4.1.Sifat-Sifat Sedimen Pada Estuari

Estuari merupakan tempat berkumpulnya sedimen dari laut dan daratan (sungai). Pada umumnya sedimen yang berada di estuari diklasifikasikan sebagai sedimen kohesif dan non kohesif. Sedimen non kohesif terdiri dari partikel/butir-butir terpisah (pasir) dimana gerakannya tergantung pada sifat-sifat fisik butiran, seperti halnya dimensi (ukuran), bentuk dan berat jenis dan juga kontak dengan butir-butir lain. Sedangkan Sedimen kohesif adalah sedimen

dimana tahanan erosinya tergantung pada kohesi diantara partikel dan terangkut dalam bentuk suspensi.

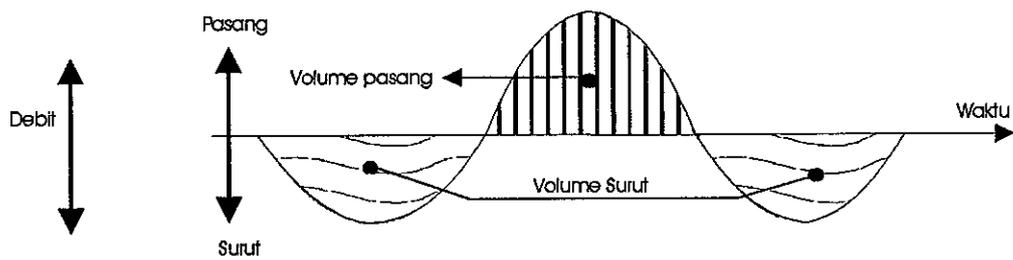
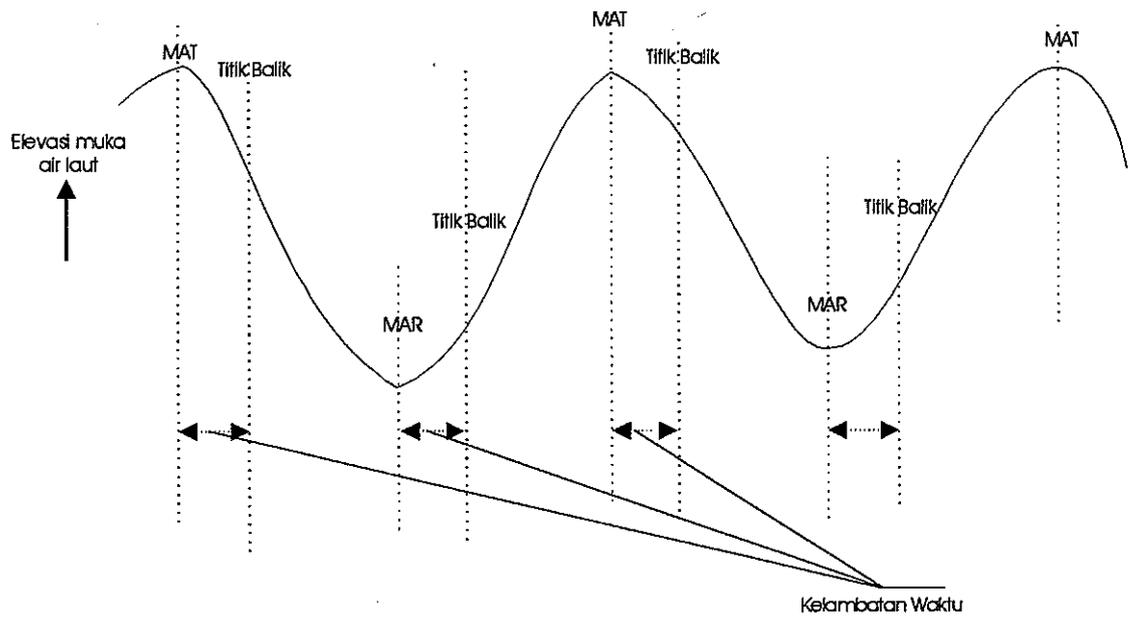
Mekanisme transport sedimen pada estuari adalah sangat kompleks. Dua faktor penting yang berperan dalam mekanisme tersebut adalah hidrodinamika aliran dan sifat-sifat sedimen. Kekomplekan aliran berasal dari pencampuran antara air asin yang berasal dari laut yang mengalami gerak bolak-balik (kearah hulu pada saat pasang dan kearah hilir pada saat surut) dan air tawar yang berasal dari debit sungai di hulu. Selain itu kondisi aliran juga berubah terhadap waktu, yaitu pada saat bulan purnama dan perbani (spring dan neap tide) dan pada musim kemarau (debit sungai kecil) dan penghujan (debit sungai besar). Sebagian besar sedimentasi yang terjadi di estuari adalah hasil dari flokulasi. Pembentukan flokon dipengaruhi oleh salinitas dan konsentrasi suspensi dimana mulai dari suatu nilai tertentu pembentukan flokon akan dipercepat.

Di estuari, sedimen suspensi mengalami siklus berulang antara erosi, transpor dan pengendapan, yang dipengaruhi oleh debit sungai dan pasang surut. Pada titik balik (*slack*) dimana arus berubah dari arus pasang menjadi surut (atau sebaliknya) dimana kecepatan aliran kecil, sedimen suspensi akan mengendap didasar. Selanjutnya kecepatan arus bertambah (pada saat arus pasang atau surut), sampai dicapai suatu kecepatan tertentu yang mampu mengerosi sedimen yang sebelumnya diendapkan. Pada kecepatan arus diantara kedua nilai tersebut sedimen tersuspensi akan terangkut oleh aliran.

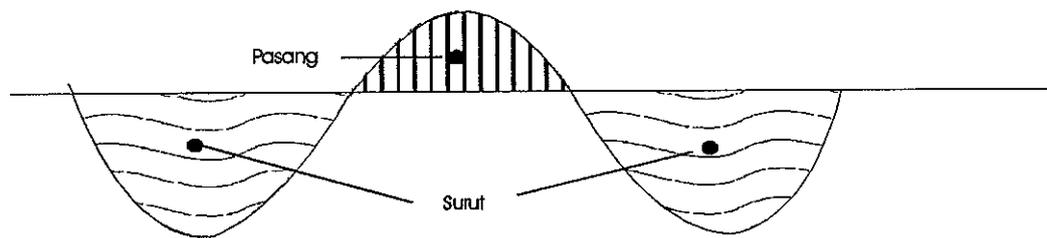
Dalam transpor suspensi dibedakan dua keadaan yaitu :

1. Sedimen yang terangkut jauh lebih halus dari pada sedimen yang membentuk dasar sungai sehingga sedimen tersebut tidak sempat mengendap sampai akhirnya mengendap didaerah dengan keadaan air tenang.
2. Transpor yang terjadi akibat adanya perpindahan antara dasar dan suspensi yang tergantung pada perlambatan aliran.

Di daerah pencampuran (*mixing zone*), dimana salinitas dan turbulensi relatif besar, sedimen kohesif yang terangkut aliran sungai akan membentuk flokan dengan dimensi dan kecepatan endap jauh lebih besar daripada dimensi dan kecepatan endap partikel tunggal. Pada periode dengan kecepatan kecil flokan tersebut akan diendapkan di dasar.



(A) Tidak ada debit dari hulu sungai



(B) ada debit dari hulu sungai

Gambar 3.1. prisma pasang surut (Bambang Triatmojo, 1999)

Di Estuari sedimen kohesif dapat terbentuk dalam empat kondisi berbeda yaitu suspensi yang ditranspor ke arah horisontal suspensi stasioner, endapan terkonsolidasi sebagian dan endapan terkonsolidasi. *Suspensi stasioner* adalah hasil pengendapan suspensi apabila kecepatan aliran adalah kecil. Endapan tersebut mempunyai kandungan air yang cukup besar sehingga konsentrasi dan tegangan kritik erosi kecil. Konsentrasi endapan adalah sekitar 80 gr/l (*Kirby dan Parker dalam Hayter, 1984*). Erosi suspensi stasioner terjadi beberapa saat setelah arus balik dari air rendah maupun air tinggi.

Pada waktu kecepatan aliran bertambah, gerakan sedimen terjadi pada permukaan antara air dan sedimen dan akhirnya sedimen tererosi. *Endapan terkonsolidasi sebagian* yang dibentuk oleh endapan stasioner, mempunyai kandungan air kecil dan tegangan kritik erosi besar. Endapan tersebut tererosi partikel demi partikel apabila tegangan tarik lebih besar dari tegangan kritik erosi ($\tau_0 > \tau_{ce}$).

Endapan terkonsolidasi adalah hasil konsolidasi dari endapan terkonsolidasi sebagian. Endapan terkonsolidasi mempunyai konsentrasi sekitar 480 gr/l (*Hayter, 1978*). Distribusi vertikal sedimen suspensi di dalam pengaliran permanen dinyatakan secara analitis berdasarkan persamaan berikut :

$$K_z \frac{\partial C}{\partial Z} + W_s C = 0 \dots\dots\dots (3.3)$$

dengan :

- C : konsentrasi sedimen pada ketinggian z dari dasar
- W_s : kecepatan endap sedimen
- K_z : koefisien difusi vertikal sedimen

Persamaan tersebut menunjukkan keseimbangan antara partikel yang mengendap ($W_s C$) karena pengaruh gravitasi dan fluk sedimen yang naik karena pengaruh difusi ($K_z \frac{\partial C}{\partial Z}$).

Pada persamaan tersebut harus ditambahkan kondisi batas berikut :

$$C = 0 \quad \text{Pada permukaan air}$$

$C = C_a$ Menunjukkan konsentrasi pada titik dengan elevasi $z = a$ dari dasar.

Beberapa peneliti mengkaitkan koefisien difusi vertikal sedimen dengan koefisien viskositas turbulen dengan bentuk sebagai berikut (Dyer 1986):

$$K_z = \beta \phi \varepsilon_z \dots \dots \dots (3.4)$$

dimana : ε_z adalah koefisien viskositas turbulen,

$$\varepsilon_z = 0.067 \cdot U_* H$$

faktor β menunjukkan perbedaan antara difusi oleh partikel sedimen dan difusi dari partikel air yang dianggap konstan pada seluruh kedalaman aliran.

Faktor β diberikan oleh persamaan berikut (Dyer 1986) :

$$\beta = 1 + 2 \left(\frac{W_s}{U_*} \right)^2 \text{ untuk } 0,1 < \frac{W_s}{U_*} < 1 \dots \dots \dots (3.5)$$

H : Kedalaman air

w_s : kecepatan endap sedimen suspensi

U_* : kecepatan geser

$$U_* : \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}}$$

τ_b : tegangan geser di dasar

ρ : rapat massa zat cair

koefisien ϕ memperhitungkan pengurangan konstanta Von Karman yang mempunyai harga kurang dari 0,4 dalam aliran dengan suspensi. Pencampuran sedimen berkurang dengan bertambahnya konsentrasi sedimen.

Koefisien ϕ dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut (Elder, 1978):

$$\phi = 1 + \left(\frac{C}{C_0} \right)^{0,8} - 2 \left(\frac{C}{C_0} \right)^{0,4} \dots \dots \dots (3.6)$$

dengan :

C : konsentrasi sedimen

C_0 : konsentrasi maksimum sedimen.

3.5. Metode Numerik

Metode numerik merupakan teknik untuk menyelesaikan permasalahan-permasalahan yang diformulasikan secara matematis dengan cara operasi hitungan (arithmetic). Dalam model numerik ini dilakukan operasi hitungan dalam jumlah yang sangat banyak dan berulang-ulang.

Penyelesaian numerik dari persamaan matematis yang menggambarkan fenomena alam yang berpengaruh, disusun dalam bentuk persamaan pengatur dan digunakan sebagai model numeris .

Pada kebanyakan metoda numerik untuk menyelesaikan persamaan differensial parsial, langkah pertama yang dilakukan adalah mengubah persamaan differensial parsial kedalam bentuk persamaan diferensial numerik (aljabar). Persamaan tersebut merupakan hubungan antara harga-harga dari variable tidak bebas, misalnya V , pada titik-titik disekitarnya didalam bidang $x - t$ yang ditinjau, dimana x adalah posisi ruang dan t adalah waktu, maka variable $V = f(x,t)$, yang muncul dalam persamaan diferensial pasial, kemudian diubah dalam bentuk diskret sistim persamaan dalam bentuk diskret tersebut diselesaikan secara numeric dengan menggunakan komputer , untuk mendapatkan variable tak bebas di titik –titik hitungan.

3.5.1. Metode Beda Hingga (*Finite Difference*)

Persamaan aliran air yang telah diberikan adalah persamaan differential parsial nonlinier. Karena persamaan nonlinier maka penyelesaian analitik persamaan diatas sangat sulit bahkan tidak mungkin, kecuali untuk kasus yang sangat sederhana. Maka persamaan diatas dapat diselesaikan dengan menggunakan metode numerik, antara lain yaitu metode beda hingga (*finite different method*), Cara numerik adalah cara pendekatan ,jadi dengan cara numeric permasalahan hanya mendapatkan jawaban pendekatan persamaan differential semula. Metode elemen hingga misalnya , mudah diterapkan untuk kasus dimana batas-batas aliran tidak beraturan (*irregular boundary*), tetapi memerlukan waktu perhitungan dan memory lebih besar terutama jika dipakai untuk masalah aliran tidak permanen (*unsteady flow*) dua dan tiga dimensi.

Disamping itu perumusan dan pemrograman dengan metode ini sulit dijamin, sehingga kekekalan massa dan momentum sulit dijamin.

Metode beda hingga adalah metode yang paling banyak digunakan untuk memecahkan masalah aliran dan angkutan polutan disungai, muara dan perairan pantai, karena perumusannya relatif lebih mudah dan efisien serta memberikan hasil yang lebih memuaskan. Untuk menjamin sifat-sifat konservatif dari pembaganan beda hingga pada umumnya digunakan pendekatan ruang tilik (*control volume*). Namun penerapan metode selisih hingga untuk kasus dimana batas-batas aliran tidak beraturan atau dimana kita ingin membuat grid yang tidak beraturan akan mengalami kesulitan.

Penerapan metode selisih hingga pada aliran yang mempunyai batas tidak beraturan atau dimana kita ingin membuat grid yang tidak beraturan biasanya dilakukan dengan menggunakan transformasi koordinat, yaitu dari koordinat Catersian ke dalam koordinat lengkung "*curvilinier coordinate*". Dengan cara ini maka persamaan hidrodinamik dan persamaan angkutan polutan dalam koordinat cetersian ditransformasikan ke dalam bentuk koordinat lengkung dan kemudian persamaan hidrodinamik dan persamaan angkutan polutan yang sudah dalam bentuk koordinat lengkung dikepingkan menurut pembaganan selisih hingga.

A. Persamaan Deret Taylor.

Deret Taylor merupakan dasar untuk menyelesaikan masalah dalam analisa numerik, terutama penyelesaian persamaan diferensial. Jika suatu fungsi $f(x)$ diketahui dititik x_i dan semua turunan dari f terhadap x diketahui pada titik tersebut, maka dengan deret Taylor dapat dinyatakan harga f pada titik x_{i+1} yang terletak pada jarak x dari titik x_i .

$$f(x_{i+1}) \approx f(x_i) + f'(x_i) \frac{\Delta x}{1!} + f''(x_i) \frac{\Delta x^2}{2!} + f'''(x_i) \frac{\Delta x^3}{3!} + \dots + f^{(n)}(x_i) \frac{\Delta x^n}{n!} + R_n \dots (3.7)$$

dengan ,

$$R_n = f^{(n+1)}_{(x_i)} \frac{\Delta x^{n+1}}{(n+1)!} + f^{(n+2)}_{(x_i)} \frac{\Delta x^{n+2}}{(n+2)!} + \dots (3.8)$$

Persamaan (3.7) yang mempunyai suku sebanyak tak terhingga akan memberikan perkiraan harga suatu fungsi sesuai dengan penyelesaian analitisnya.

1. Memperhitungkan Satu Suku Pertama.

Apabila harga diperhitungkan satu suku pertama dari ruas kanan, maka persamaan (3.7) dapat ditulis dalam bentuk

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) \dots \dots \dots (3.9)$$

Persamaan (3.9) disebut sebagai perkiraan order nol, harga f pada titik x_{i+1} sama dengan harga pada x_i .

Perkiraan tersebut adalah benar jika fungsi yang diperkirakan adalah konstan. Jika fungsi tidak konstan, maka harus diperhitungkan suku-suku berikutnya dari Deret Taylor.

2. Memperhitungkan Dua Suku Pertama (order 1).

Bentuk Deret Taylor order satu dapat ditulis dalam bentuk :

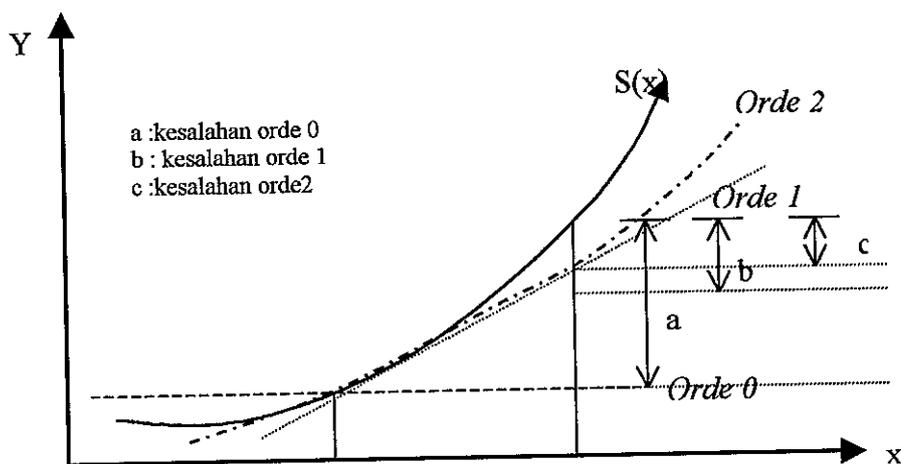
$$f(x_{i+1}) = f(x_i) + f'(x_i) \frac{\Delta x}{1!} \dots \dots \dots (3.10)$$

yang merupakan suatu garis lurus (naik/turun).

3. Memperhitungkan Dua Suku (order 2)

Bentuk Deret Taylor order satu dapat ditulis dalam bentuk :

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) + f'(x_i) \frac{\Delta x}{1!} + f''(x_i) \frac{\Delta x^2}{2!} \dots \dots \dots (3.11)$$



Gambar,3.2. Fungsi Dengan Kesalahan orde

B. Truncation Error.

Deret Taylor akan memberikan perkiraan suatu fungsi dengan benar jika semua suku dari deret tersebut diperhitungkan. Dalam praktek hanya beberapa suku pertama saja yang diperhitungkan sehingga hasil perkiraan tidak tepat seperti pada penyelesaian analitis. Ada kesalahan karena tidak diperhitungkannya suku-suku terakhir dari Deret Taylor, Kesalahan ini disebut dengan truncation error (kesalahan pemotongan R_n) $\rightarrow R_n = O(\Delta x^{n+1})$

Truncation error ini kecil jika :

1. Memperhitungkan lebih banyak suku Deret Taylor
2. Δx mempunyai nilai kecil

Pada perkiraan order satu, besarnya truncation error adalah :

$$O(\Delta x^2) = f''(x_i) \frac{\Delta x^2}{2!} + f'''(x_i) \frac{\Delta x^3}{3!} + \dots \quad (3.12)$$

C. Diferensial Numerik.

Deret Taylor pada persamaan (3.7) dapat ditulis dalam bentuk :

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) + f'(x_i)\Delta x + O(\Delta x^2) \dots \quad (3.13)$$

atau

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{\Delta x} - O(\Delta x) \dots \quad (3.14)$$

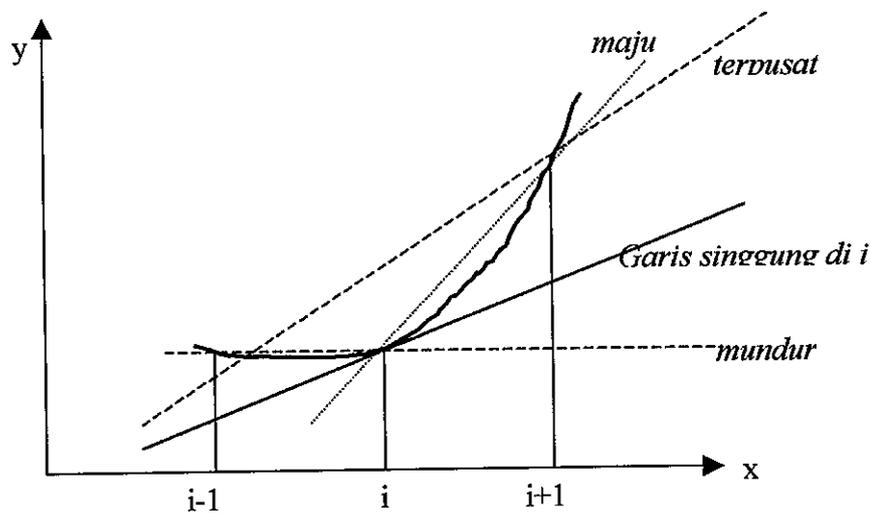
Bentuk diferensial dari persamaan (2.14) disebut diferensiasi maju order satu. disebut diferensial maju karena menggunakan data pada titik x_i dan x_{i+1} untuk memperhitungkan diferensial. Jika data yang digunakan adalah titik x_i dan x_{i-1} , maka disebut diferensial mundur, dan Deret Taylor menjadi :

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) - f'(x_i)\Delta x + f''(x_i) \frac{\Delta x^2}{2!} - f'''(x_i) \frac{\Delta x^3}{3!} + \dots \quad (3.15)$$

atau

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) - f'(x_i)\Delta x + O(\Delta x^2) \dots \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial s}{\partial x} = f'(x_i) = \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{\Delta x} + O(\Delta x) \dots \quad (3.17)$$



Gambar,3.3. Pendekatan beda pusat,beda maju,dan beda mundur

Apabila data yang digunakan untuk memperkirakan diferensial dari fungsi adalah pada titik x_{i-1} dan x_{i+1} , maka perkiraannya disebut diferensi terpusat. Jika persamaan (3.7) dikurangi persamaan (3.15) didapat

$$f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}) = 2f'(x_i)\Delta x + f'''(x_i)\frac{\Delta x^3}{3} + \dots$$

atau

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}))}{2\Delta x} - f'''(x_i)\frac{\Delta x^2}{6} - \dots$$

atau

$$f(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}))}{2\Delta x} + O(\Delta x^2) \dots \dots \dots (3.18)$$

Dari persamaan (3.18) terlihat bahwa truncation error berorder Δx^2 , sedang pada diferensi maju dan mundur berorder Δx . Hal ini menunjukkan bahwa perkiraan diferensi terpusat lebih teliti dibanding diferensi maju atau mundur.

Jika persamaan (3.7) dijumlahkan dengan persamaan (3.15) didapat :

$$f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}) = 2f'(x_i) + 2f''(x_{i-1})\frac{\Delta x^2}{2!} + 2f^{iv}(x_i)\frac{\Delta x^4}{4!} + \dots$$

atau

$$f''(x_i) = \frac{f(x_{i-1}) - 2f(x_i) + f(x_{i+1}))}{\Delta x^2} - f^{iv}(x_i) \frac{\Delta x^2}{12} - \dots$$

atau

$$f''(x_i) = \frac{f(x_{i-1}) - 2f(x_i) + f(x_{i+1}))}{\Delta x^2} + O(\Delta x^2) \dots (3.19)$$

Dari uraian diatas dapat disimpulkan bahwa bentuk diferensial (biasa ataupun parsial) dapat diubah dalam bentuk beda hingga. Suatu fungsi f yang mempunyai variable x dan t misalnya, turunan pertama dan kedua dari f terhadap x dan t dapat ditulis :

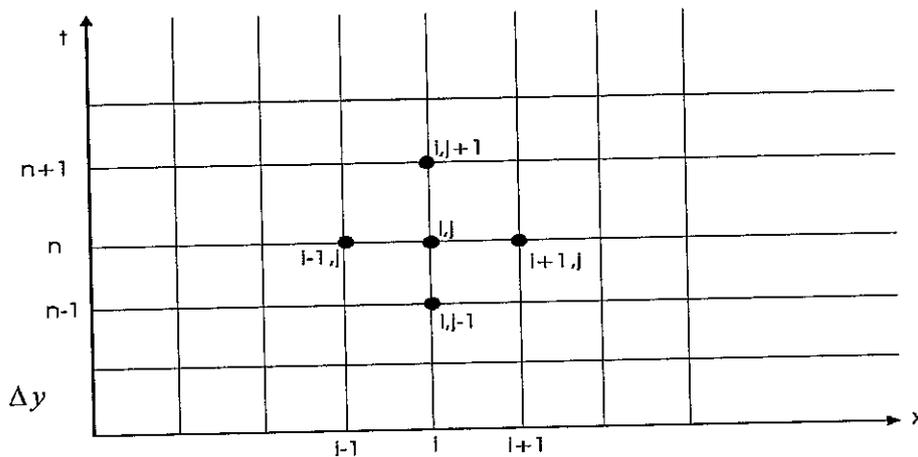
$$\frac{\partial f}{\partial x} = f(x) = \frac{f(x_{i-1}) - f(x_i)}{\Delta x} = \frac{f(x_i) - f(x_{i+1}))}{\Delta x} = \frac{\delta(x_{i+1}) - \delta(x_{i-1}))}{2\Delta x} \dots (3.20)$$

$$\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} = \frac{S(x_{i-1}) - 2S(x_i) + S(x_{i+1}))}{\Delta x^2} \dots (3.21)$$

demikian juga diferensial terhadap t

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{S(t_{n+1}) - S(t_n)}{\Delta t} \dots (3.22)$$

$$\frac{\partial^2 S}{\partial t^2} = \frac{S(t_{i-1}) - 2S(t_n) + S(x_{i+1}))}{\Delta t^2} \dots (3.23)$$



Gambar 3.4. grid/kisi /jaringan titik simpul

$$\frac{\partial s}{\partial x} \Big|_{i,i} = \frac{S_{i+1}^n - S_{i-1}^n}{2\Delta x} = \frac{S_{i+1,j} - S_{i-1,j}}{2\Delta x}$$

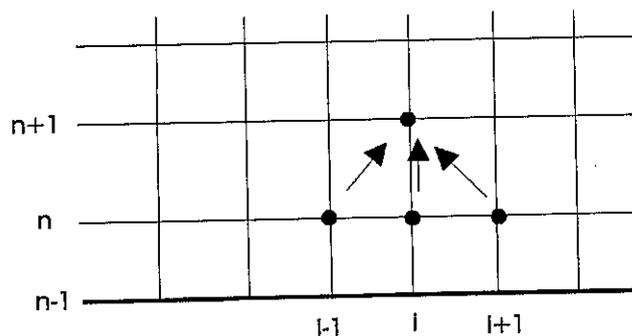
$$\frac{\partial s^2}{\partial x^2} \Big|_{i,i} = \frac{S_{i-1+j} - 2S_{i,j} + S_{i+1,j}}{\Delta t^2}$$

Beberapa metode dasar dalam penyelesaian persamaan parabolis antara lain adalah :

- Metode/Skema Eksplisit.
- Metode/Skema Implisit.
- Metode/Skema Crank-Nicholson.

1. Skema Eksplisit.

Pada skema eksplisit, variable pada waktu $n+1$ dihitung berdasarkan variable pada waktu n yang sudah diketahui



Gambar 3.5 grid/kisi/jaringan titik simpul dari skema eksplisit.

Dengan menggunakan skema seperti yang ditunjukkan pada gambar diatas, fungsi $S(x,t)$ dan turunannya dalam ruang dan waktu didekati oleh bentuk berikut :

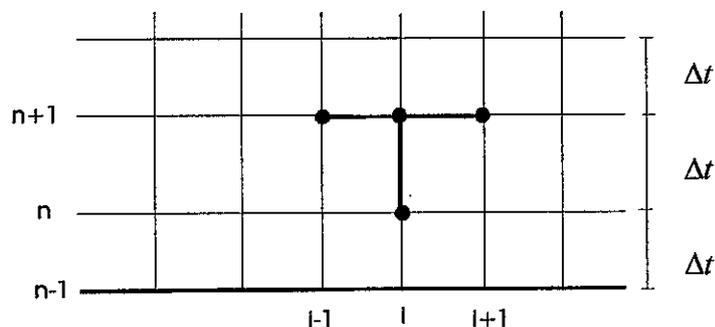
$$S(x,t) = S_i^n$$

$$\frac{\partial s(x,t)}{\partial t} = \frac{S_i^{n+1} - S_i^n}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial s^2(x,t)}{\partial t^2} = \frac{S_{i-1}^n - 2S_i^n + S_{i+1}^n}{\Delta x^2}$$

2. Skema Implisit.

Dalam skema eksplisit, ruas kanan dari persamaan ditulis pada waktu t_n yang harganya sudah diketahui, sedangkan pada skema implisit, ruas kanan tersebut ditulis pada waktu $n+1$ dimana harganya belum diketahui.



Gambar,3.6. grid/kisi/jaringan titik simpul dari skema implisit.

Gambar diatas menunjukkan grid/kisi/jaringan titik simpul dari skema implisit. Dengan menggunakan skema tersebut, fungsi $S(x,t)$ dan turunannya dalam ruang dan waktu didekati oleh bentuk berikut :

$$S(x,t) = S_i^n \quad \text{atau} = S_i^{n+1}$$

$$\frac{\partial S(x,t)}{\partial t} = \frac{S_i^{n+1} - S_i^n}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial s(x,t)}{\partial x} = \frac{S_{i+1}^{n+1} - S_{i-1}^{n+1}}{2\Delta x}$$

$$\frac{\partial s^2(x,t)}{\partial x^2} = \frac{S_{i-1}^{n+1} - 2S_i^{n+1} + S_{i+1}^{n+1}}{\Delta x^2}$$

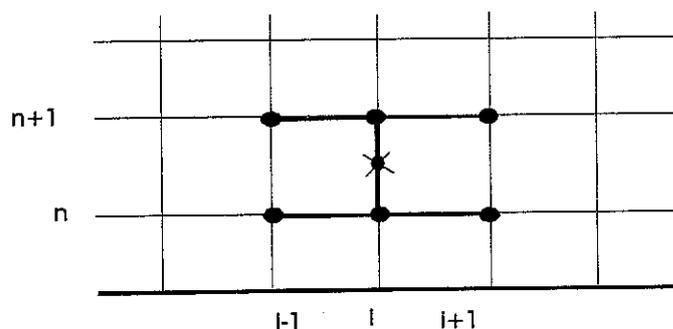
Penyelesaian persamaan dilakukan dalam dua langkah yaitu langkah pertama bergerak dari kiri kekanan (dari $i=1$ menuju ke $i = M$). Penyelesaian dengan menggunakan skema implisit lebih sulit dibanding dengan skema eksplisit. Kelebihan dari skema implisit adalah skema stabil tanpa syarat, langkah waktu dapat diambil sembarang tanpa menimbulkan ketidakstabilan. Pembatasan t hanya untuk menjaga kesalahan pemotongan (truncation error) dalam batas-batas yang dapat diterima.

3. Skema Crank-Nicholson.

Dalam skema eksplisit, ruas kanan dari persamaan ditentukan pada waktu n , sedangkan dalam skema implisit ruas kanan dari persamaan ditulis untuk waktu $n+1$. Dalam kedua skema tersebut diferensial terhadap waktu $\partial s / \partial t$ ditulis dalam bentuk :

$$(S_i^{n+1} - S_i^n) / \Delta t$$

yang berarti dalam waktu $n + \frac{1}{2}$ skema Crank-Nicholson menulis ruas kanan dari persamaan pada waktu $n + \frac{1}{2}$, yang merupakan harga rata-rata dari skema eksplisit dan implisit . Skema jaringan titik simpul adalah.



Gambar 3.7, Skema jaringan titik simpul Crank-Nicholson

$$\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{S_{i-1}^{n+1} - 2S_i^{n+1} + S_{i+1}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{S_{i-1}^n - 2S_i^n + S_{i+1}^n}{\Delta x^2} \right) \right)$$

Dengan menggunakan skema diatas persamaan dapat ditulis :

$$\frac{S_i^{n+1} - S_i^n}{\Delta t} = \frac{1}{2} \left(\frac{S_{i-1}^{n+1} - 2S_i^{n+1} + S_{i+1}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{S_{i-1}^n - 2S_i^n + S_{i+1}^n}{\Delta x^2} \right) \right)$$

Suku kedua ruas kanan dari persamaan diatas telah diketahui. Terlihat bahwa persamaan diatas adalah persamaan implisit, yang penyelesaiannya sama dengan yang telah diterangkan pada skema implisit. Kelebihan dari skema ini adalah bahwa untuk harga Δx tertentu kesalahan pemotongan pada suku dalam Δt adalah lebih kecil daripada dalam skema implisit dan eksplisit

Sebagai kesimpulan dari ketiga skema tersebut diatas, maka persamaan dapat ditulis dalam bentuk :

$$\frac{S_i^{n+1} - S_i^n}{\Delta t} = \Phi \left(\frac{S_{i-1}^{n+1} - 2S_i^{n+1} + S_{i+1}^{n+1}}{\Delta x^2} + (1 - \Phi) \left(\frac{S_{i-1}^n - 2S_i^n + S_{i+1}^n}{\Delta x^2} \right) \right) \dots (3.24)$$

Dimana Φ adalah koefisien dengan harga :

$\Phi = 0$, apabila skema adalah eksplisit

$\Phi = 1$, apabila skema adalah implisit.

$\Phi = 1/2$, apabila skema adalah Crank-Nicholson

Bentuk Persamaan (2.24) adalah stabil tanpa syarat untuk $\Phi \geq \frac{1}{2}$, dan stabil

dengan syarat untuk $\Phi < \frac{1}{2}$.

3.6. Penelitian Yang telah dilakukan.

Beberapa penelitian yang berkaitan dengan model numeris pada estuari telah dilakukan sebelumnya oleh beberapa peneliti. Kajian ini dilakukan untuk memberikan gambaran secara singkat tentang hasil-hasil peneliti terdahulu yang terkait baik dalam metode, obyek yang diteliti maupun daerah kajian. Dari gambaran singkat ini diharapkan dapat menjadi masukan dalam rangka melakukan pembahasan, analisis dan juga pengembangan metode.

3.6.1. Bambang Triatmodjo (1988)

Penelitian yang dilakukan yaitu. menentukan nilai parameter pada model Hidraulik Estuari Bengawan Solo.

Model yang digunakan yaitu model numeris satu dimensi dengan menggunakan skema Implisit Preissmann. Model numeris yang dibangun digunakan untuk tujuan memodelkan penjalaran gelombang pasang surut dan intrusi air asin satu dimensi.

Maksud dari model satu dimensi yang ditulis pada penelitian tersebut adalah menghitung fluktuasi muka air, debit dan salinitas sebagai fungsi waktu dan jarak sepanjang estuari. Variabel yang dihitung merupakan harga rata-rata pada penampang aliran. Beberapa asumsi yang digunakan dalam pemodelan tersebut antara lain yaitu :

Aliran adalah satu dimensi, distribusi kecepatan pada tampang lintang : adalah merata dan muka air pada arah melintang adalah horizontal.

1. Saluran dianggap lurus.
2. Tekanan adalah Hidrostatik, artinya percepatan vertikal diabaikan
3. Pengaruh gesekan dinding dan turbulensi dapat dinyatakan oleh gaya tahanan seperti dalam aliran seragam.
4. Kemiringan dasar saluran rerata adalah kecil sehingga cosinus sudut yang dibentuk terhadap horizontal adalah satu.
5. Gaya coriolis dan gaya yang ditimbulkan oleh angin diabaikan.
6. Pengaliran adalah berubah beraturan (gradually varied unsteady flow).
7. Pengaliran tidak permanen satu dimensi disaluran terbuka dinyatakan dalam dua variable bebas, elevasi muka air Y dan debit Q disetiap tampang memanjang sungai setiap saat.

Persamaan dasar yang digunakan untuk pemodelan meliputi beberapa persamaan antara lain yaitu :

a). Persamaan Kontinuitas Air

dengan variable Q dan y

$$B \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

b). Persamaan Energi.

Persamaan Energi dihitung berdasarkan persamaan st Venant dengan beberapa variable anatara lain :

Persamaan Barre de st venant dengan variable Q dan h

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gA(S_f - S_0) = 0$$

Persamaan st venant dengan variable v dan h

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{A}{B} \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{v}{B} \frac{\partial A}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + gA(S_0) = 0$$

Persamaan st venant dengan variable v dan y

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{A}{B} \frac{\partial v}{\partial x} + v \left(\frac{\partial h}{\partial t} + S_0 \right) \frac{v}{B} \frac{\partial A}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} + gA(S_0) = 0$$

dimana :

v = kecepatan aliran

B = lebar tampang melintang

A = Luas tampang

g = percepan grafitasi

S_0 = kemiringan dasar saluran $\left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)$

c). Model Intrusi air Asin.

Perhitungan matematis didasarkan pada bentuk difusi molekuler dalam satu dimensi arah memanjang dengan memperhitungkan persamaan kontinuitas.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(AK \times \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

U = Kecepatan rerata pada tampang lintang

C = Konsentrasi

A = Tampang lintang

Kx = Koefisien difusi memanjang

3.6.2. Pitara SWL (1987)

Membuat model perembesan garam di sungai / estuari berdasarkan data masukan dari sungai Mesuji di Sumatera Selatan, Persamaan Hidrodinamika yang digunakan belum memperhitungkan rapat massa garam sebagai fungsi kegraman. Beberapa Persaman dasar yang digunakan untuk pembuatan model :

a).Persamaan Kontinuitas Air.

Persamaan tersebut ditulis dalam bentuk :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0$$

Persamaan tersebut merupakan bentuk dari persamaan kontinuitas untuk aliran tidak permanen. Apabila pada saluran terjadi masukan atau limpasan secara lateral (lateral inflow / outflow) seperti masuknya aliran air dari daerah disampingnya atau luapan air keluar dari saluran, maka persamaan kontinuitas menjadi :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} \pm q = 0$$

dengan q adalah debit lateral tiap satuan panjang.

b)Persamaan Energi

Penurunan persamaan energi untuk aliran tidak permanen pada saluran terbuka, dilakukan dengan menganggap bahwa stress angin, coriolis dan pembangkit pasang surut dapat diabaikan, penyederhanaan yang dilakukan adalah mengkonsentrasikan semua energi yang hilang akibat gesekan, tumbukan, turbulensi dan sebagainya sepanjang dinding sungai. Sehingga gaya yang bekerja hanya tekanan dan gaya gesekan.

variabel yang digunakan adalah variabel kedalaman air /tinggi muka air.

Bentuk dari persamaan dengan menggunakan variabel tinggi muka air atau kedalaman (h) adalah :

$$-\rho g \left(\frac{\partial h}{\partial x} + I \right) - \rho g v |v| / C^2 R = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

Dimana :
 h = kedalaman
 ρ = rapat massa
 g = gravitasi
 v = kecepatan aliran
 C = koef. Chezy
 R = Jari-jari hidrolik penampang

c) Persamaan Kontinuitas Garam.

Persamaan kontinuitas garam diturunkan analog dengan persamaan kontinuitas untuk air

Bedasarkan hukum kekekalan massa yaitu bahwa bahan yang masuk dikurangi dengan bahan yang keluar akan sama dengan pertambahan bahan, maka akan didapat persamaan sebagai berikut :

$$\tau dt - \left(\tau + \frac{\partial \tau}{\partial x} dx \right) dt = \left(a + \frac{\partial a}{\partial t} \right) \left(C + \frac{\partial C}{\partial t} dt \right) dx - a C dx$$

dimana :

τ = angkutan garam per satuan lebar
 C = konsentrasi garam
 A = luas tampang.

d). Persamaan Transport Garam

Secara matematis bentuk difusi molekuler di dalam zat cair diam dapat digambarkan didalam bentuk persamaan tiga dimensi berikut ini :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial c}{\partial x} \left(\epsilon_m \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial c}{\partial y} \left(\epsilon_m \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial c}{\partial z} \left(\epsilon_m \frac{\partial c}{\partial z} \right)$$

dengan c adalah konsentrasi garam ϵ_m koefisien difusi molekuler (m^2/d) difusi molekuler adalah sangat lemah, yaitu sekitar $10^{-6}/dt$, tetapi apabila air bergerak dengan aliran turbulen, dimana harga koefisien difusi turbulen jauh lebih besar dari koefisien difusi molekuler, selain difusi turbulen pada zat cair yang mengalir juga akan terjadi proses adveksi.

3.6.3. Mulyani (1990)

Penelitian yang telah dilakukan yaitu tentang sirkulasi arus di perairan Semarang yang berkaitan dengan pola sirkulasi arus laut yang disebabkan oleh angin di Perairan Utara Jawa Tengah. Penelitian lanjutan yang berkaitan dengan pola sirkulasi arus dilakukan di pantai Banjir Kanal Timur Semarang.

Untuk mendapatkan pola arus tersebut telah dilakukan simulasi hidrodinamika Hasil simulasi yang berupa elevasi di beberapa titik ini digunakan sebagai syarat batas Persamaan hidrodinamika yang digunakan diselesaikan dengan metode eksplisit. Dari hasil kajian tersebut diperoleh bahwa sirkulasi arus pada musim kemarau memiliki arah barat laut dan tenggara. Sedangkan pada musim penghujan variasi arus dengan arah tenggara, barat, dan baratlaut.

Sirkulasi arus yang disebabkan oleh elevasi muka laut atau pasang surut diperoleh bahwa pada saat pasang tertinggi dan pasang menuju surut pola arus bergerak dari timur / timurlaut ke barat / baratlaut Sedangkan pada saat surut terendah dan surut menuju pasang pola arus bergerak dari barat / baratlaut ke timur / timurlaut.

3.6.4. Setiadi (1998)

Penelitian yang dilakukan yaitu Studi tentang penyebaran logam berat di Pantai Semarang, khususnya untuk lokasi pantai Banjir Kanal Timur. Penyelesaian persamaan transport polutan secara numerik diselesaikan dengan menggunakan metode eksplisit arah hulu (*upstream*), dengan menggunakan koefisien gesekan angin 2×10^{-6} dengan koefisien difusi $5 m^2/dt$.

Beberapa logam pencemar yang ditinjau adalah Cd, Pb, Zn, dan Ag. Dari hasil simulasi terlihat bahwa pola sebaran polutan di perairan sangat dipengaruhi oleh pola sirkulasi arus yang terjadi di perairan tersebut. Pola penyebaran

konsentrasi polutan semakin mengecil jika semakin jauh dari sumber. Simulasi model transpor ini dapat menggambarkan pola sebaran konsentrasi polutan yang sebenarnya. Namun hasil dari simulasi tersebut tidak dapat dilakukan verifikasi secara detail dengan data lapangan. Ini disebabkan karena keterbatasan data-data, diantaranya data beban polutan dari sungai secara fungsi waktu (*time series*), pengambilan sampel air tidak dilakukan dalam waktu yang sama, tidak ada data konsentrasi di beberapa stasiun yang berupa data fungsi waktu, data awal konsentrasi polutan di perairan tersebut tidak diketahui. Secara umum simulasi model transport pada musim penghujan memberikan gambaran yang sesuai secara kualitatif dengan kondisi di lapangan, terutama dalam hal pola sebaran polutannya.

BAB IV.

METODOLOGI PENELITIAN

4.1. Umum

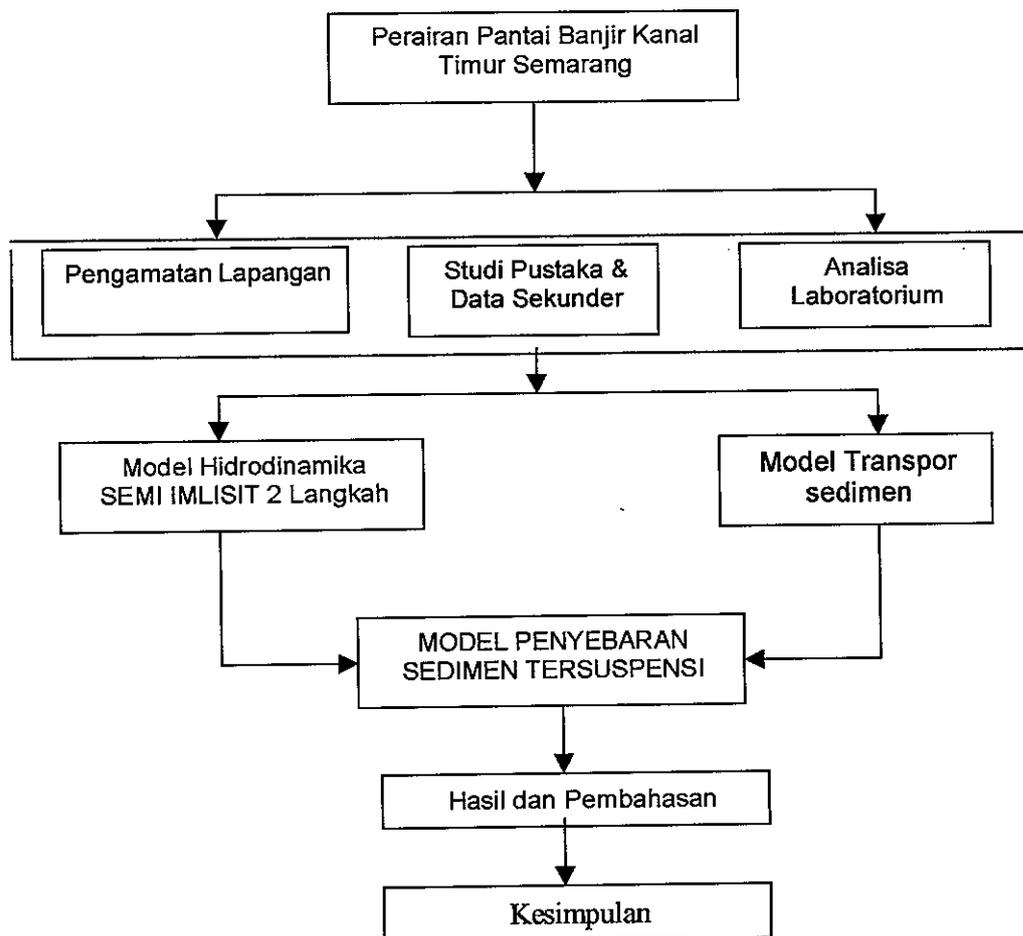
Untuk menerapkan model penyebaran sedimen tersuspensi di estuari diperlukan beberapa parameter yang berhubungan dengan pola pergerakannya dalam suatu siklus. Oleh karena itu nilai dari beberapa koefisien yang telah diperoleh dari beberapa studi pustaka dan penelitian sebelumnya dapat diterapkan penggunaannya untuk model tersebut. Sehingga diharapkan penerapan model ini dapat digunakan sebagai pendekatan untuk menelaah berbagai proses yang terjadi di perairan yang menjadi daerah penelitian yaitu perairan pantai Banjir Kanal Timur Semarang

4.2. Pendekatan Masalah dan Metode Pemecahannya

Untuk mencegah terjadinya permasalahan lingkungan yang menyebabkan terganggunya ekosistem sebagai akibat dari fungsi Perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang tersebut, maka dibutuhkan suatu pengelolaan lingkungan yang terintegrasi mulai dari sumber pencemar di hilir sungai, hingga ke daerah lepas pantai. Salah satu data yang diperlukan untuk dapat membantu kegiatan pengelolaan lingkungan tersebut adalah informasi yang memperlihatkan pola penyebaran senyawa-senyawa di perairan, serta gambaran prediksi kondisi yang akan terjadi di masa yang akan datang. Informasi tersebut dapat diperoleh melalui monitoring secara kontinu. maka diperlukan suatu pendekatan dengan menggunakan model penyebaran sedimen tersuspensi dan salinitas pada estuari.

Model tersebut dibangun dari persamaan transpor (penyebaran) 2 dimensi horisontal dengan menggunakan metode QUICKEST. Dalam penerapannya, model tersebut digabungkan dengan model hidrodinamika untuk mendapatkan masukan pola sirkulasi arusnya. Model hidrodinamika yang digunakan menggunakan metode semi-implisit 2 langkah. Model penyebaran yang akan dibahas merupakan upaya awal dalam pendekatan fenomena yang terjadi di

alam dengan mempertimbangkan karakteristik aliran yang berlangsung. Meskipun mengandung kesalahan, model ini merupakan alternatif lain yang lebih murah dan mudah dalam memperoleh gambaran sebaran yang terjadi dimasa sekarang maupun prediksinya di masa yang akan datang. Adapun diagram alir pendekatan masalah tersaji pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.1. Diagram Alir Penelitian

4.3. Metodologi.

4.3.1. Pengambilan Data.

a. Data Primer .

Data primer yang diambil meliputi :

- 1) Konsentrasi sedimen tersuspensi. Pengambilan sampel tersebut dilakukan pada stasiun S1 – S20 yang diambil relatif serentak pada tanggal 19 – 20 Oktober 2003 jam 10.00 – 14.00 oleh peneliti (lokasi pengambilan sampel dapat dilihat pada gambar 4.2.).

Pengamatan ini dilakukan untuk proses verifikasi model.

- 2) Konsentrasi sedimen tersuspensi pada stasiun S1 yang diambil 1 jam sekali selama 24 jam yang digunakan untuk mengetahui fluktuasi konsentrasi yang masuk ke perairan laut.

Pengambilan sampel air.

Pengambilan sampel air dilakukan dengan menggunakan *nansen bottle*, pada 0,2, 0,4, dan 0,6 kedalaman tiap stasiun sebanyak lima kali. Sampel dimasukkan ke dalam botol sampel untuk dianalisa nilai muatan padatan tersuspensinya.

Prinsip analisa sampel.

Zat padat dalam sampel dipisahkan dengan menggunakan filter kertas atau filter fiber glass (serabut kaca) dan kemudian zat padat yang tertahan pada filter dikeringkan pada suhu 105 derajat celcius . maka berat residu sesudah pengeringan adalah Zat Padat Tersuspensi.

Analisa Muatan Padatan Tersuspensi (MPT)

Cara kerja.

1. Panaskan filter kertas didalam oven pada suhu $\pm 150^{\circ}\text{C}$ selama 1 jam Dinginkan dalam desikator selama 15 menit dan kemudian timbang dengan cepat.
2. Sampel yang sudah dikocok merata sebanyak 100 ml dipindahkan dengan pipet ,kedalam alat penyaringan atau cawan Gooch ,yang sudah ada filter kertas didalamnya ,kemudian saring dengan sistem vakum.

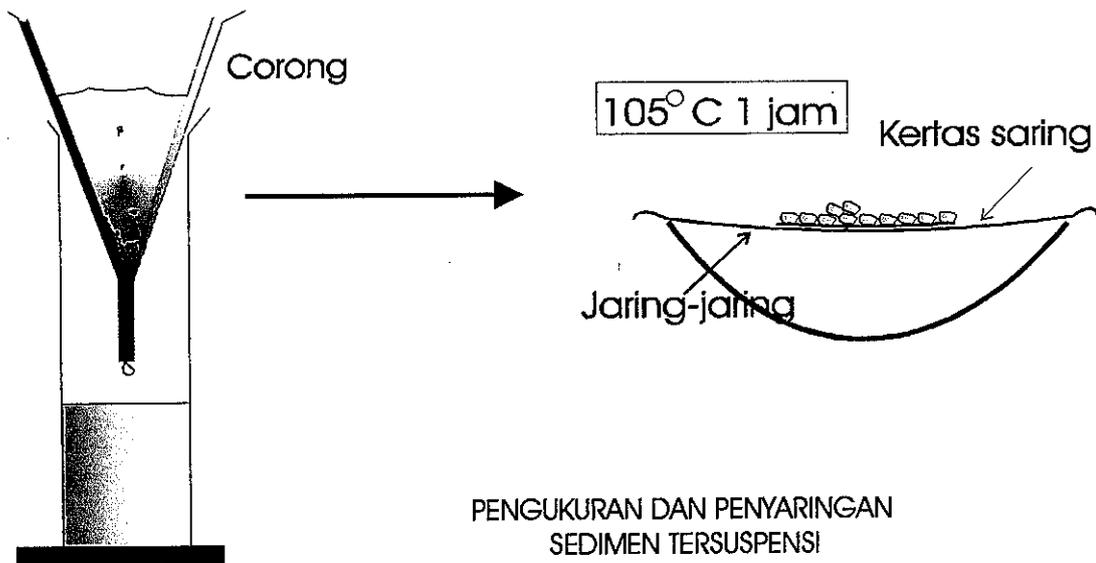
3. Filter kertas diambil dari alat penyaring dengan hati-hati dan kemudian ditempatkan diatas jaring-jaring yang diletakan pada cawan untuk dipanaskan dalam oven pada suhu $\pm 150^{\circ}\text{C}$ selama 1 jam .Kemudian dinginkan didalam desdesikator dan kemudian timbang dengan cepat. Ulangi pemanasan dan penimbangan sampai beratnya konstan,atau berkurangnya berat kurang dar 0,5 mg.

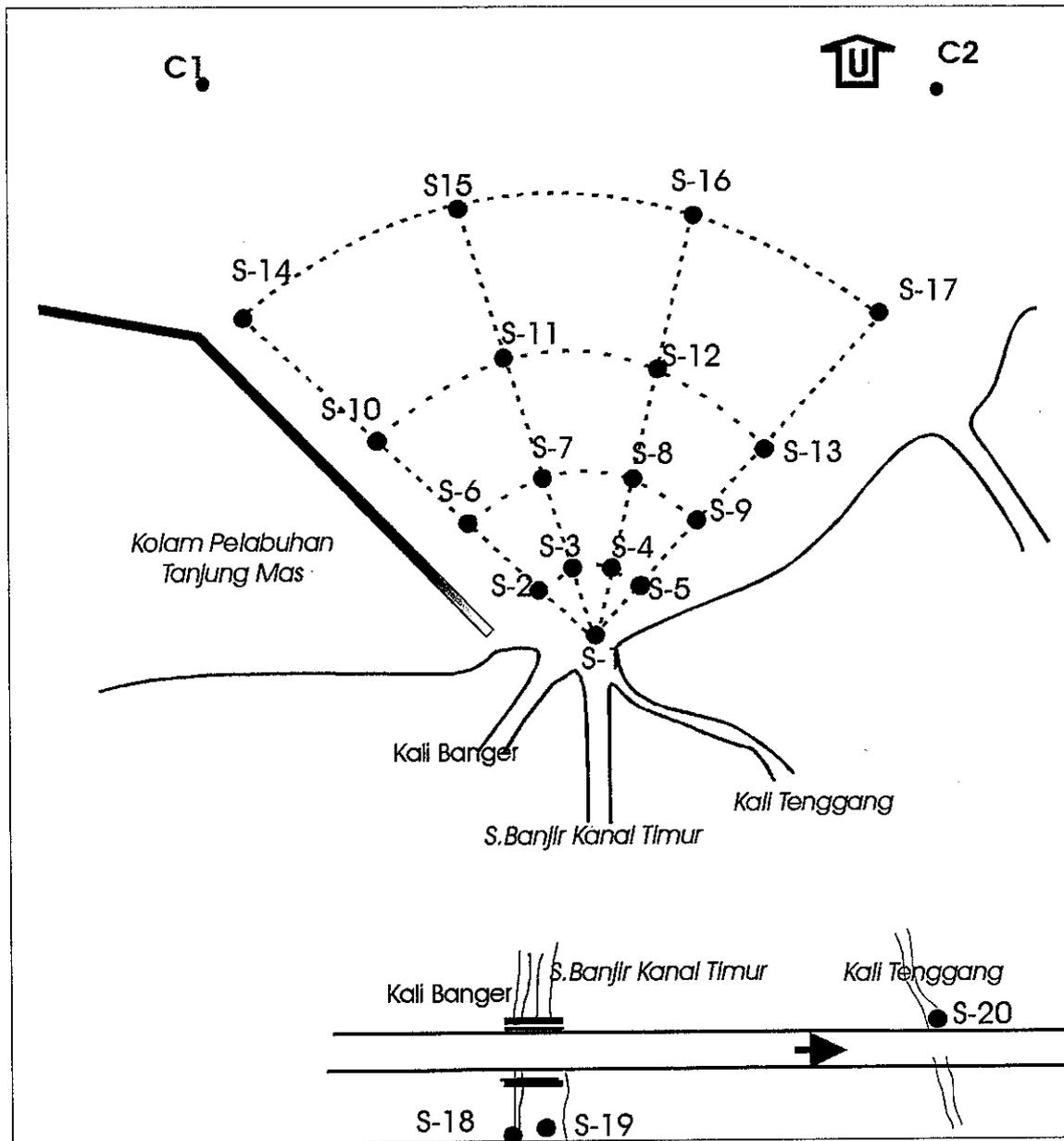
Nilai MPT diperoleh melalui perhitungan :

$$MPT = \frac{(a - b) \times 1000}{V} \text{ gr / l}$$

Keterangan :

- a = berat kertas saring dan residu sebelum pemanasan (mg)
- b = berat kertas saring setelah pemanasan (mg)
- V = volume air sampel yang tersaring (ml)





| STASIUN | koordinat kartesius | POSISI | | STASIUN | koordinat kartesius | POSISI | |
|---------|---------------------|--------------|------------|---------|---------------------|--------------|------------|
| | | B.T. | L.S | | | B.T. | L.S |
| S1 | 1000,250 | 110° 28'0 " | 6° 56'45 " | S10 | 450,1200 | 110° 27'27 " | 6° 55'48 " |
| S2 | 800,450 | 110° 27'48 " | 6° 56'36 " | S11 | 1150,1150 | 110° 28'09 " | 6° 55'42 " |
| S3 | 1050,650 | 110° 28'03 " | 6° 56'21 " | S12 | 1700,1250 | 110° 28'42 " | 6° 55'45 " |
| S4 | 1150,650 | 110° 28'18 " | 6° 56'21 " | S13 | 2200,950 | 110° 29'12 " | 6° 56'03 " |
| S5 | 1550,500 | 110° 28'33 " | 6° 56'30 " | S14 | 300,1500 | 110° 27'18 " | 6° 55'30 " |
| S6 | 1650,800 | 110° 28'39 " | 6° 56'12 " | S15 | 1150,1650 | 110° 28'09 " | 6° 55'24 " |
| S7 | 1100,950 | 110° 28'06 " | 6° 56'03 " | S16 | 2350,1500 | 110° 28'51 " | 6° 55'30 " |
| S8 | 1500,500 | 110° 28'30 " | 6° 56'30 " | S17 | 2550,1200 | 110° 29'33 " | 6° 55'48 " |
| S9 | 1850,000 | 110° 28'51 " | 6° 56'42 " | | | | |

Keterangan.

Stasiun S.18, S.19, dan S.20, pengamatan sedimen tersuspensi pada badan sungai S18, S19, dan S20 tidak termasuk dalam grid perhitungan simulasi.

Gambar.4.2. Sketsa Lokasi Penelitian

b. Data Sekunder

Data sekunder yang digunakan meliputi :

- 1) Elevasi muka laut, diperoleh dengan menggunakan komponen pasut di Stasiun Kendal, Stasiun Demak, dan Stasiun Semarang melalui peramalan pasut.
- 2) Batimetri, peta batimetri daerah penelitian diperoleh dari kegiatan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya di daerah yang sama seperti pada Gambar L-A2.

4.3.2. Penyelesaian Numerik.

a. Persamaan Model.

Pasang surut dalam pergerakannya diperairan pantai yang sempit diterangkan secara matematis dalam persamaan hidrodinamika dua dimensi dalam bentuk transport. Persamaan diturunkan dari prinsip kekekalan momentum dalam bentuk persamaan Navier-Stokes yang telah dilinierkan dari persamaan gerak rata-rata turbulen bumi berputar.

Persamaan gerak terdiri dari suku-suku advectif dan suku gesekan dasar yang diintegrasikan secara vertikal dalam sistem koordinat cartesian.

Persamaan gerak dalam arah x :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{H} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{V}{H} \frac{\partial V}{\partial y} + gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} + r \frac{U}{H^2} \sqrt{U^2 + V^2} = 0 \dots\dots\dots(4.1)$$

Persamaan gerak dalam arah y :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{H} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{V}{H} \frac{\partial V}{\partial y} + gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + r \frac{V}{H^2} \sqrt{U^2 + V^2} = 0 \dots\dots\dots(4.2)$$

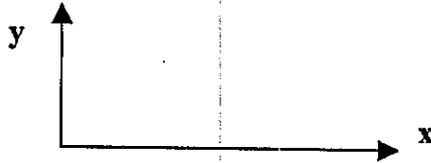
Persamaan Kontinuitas dengan asumsi bahwa fluida bersifat ideal dan inkompresibel:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots(4.3)$$

Keterangan simbol :

t : Parameter waktu (detik)

x,y : Koordinat ruang (bertambah besar ke arah timur dan utara)



ζ : elevasi muka laut pada waktu mencapai keseimbangan. (m).

U : Transpor dalam arah sb - x

$$U = \int_{-h}^{\zeta} u dz \quad (m^2 / \text{det})$$

V : transpor dalam arah sb - y

$$V = \int_{-h}^{\zeta} v dz \quad (m^2 / \text{det})$$

g : percepatan gravitasi bumi (m / det^2)

H : kedalaman aktual = $h + \zeta$ (m)

h : kedalaman laut yang tetap (m)

R : koefisien gesekan dasar.

Solusi Numerik Persamaan Model.

Penyelesaian numerik yang dilakukan untuk menyelesaikan persamaan hidrodinamika adalah dengan menggunakan *model hidrodinamika semi implisit 2 langkah*, yang merupakan modifikasi dari persamaan semi implisit.

Adapun secara singkat metode yang dikembangkan dan digunakan untuk penyelesaian numerik tersebut diuraikan pada penjelasan berikut.

Penyelesaian persamaan (4.1), (4.2), (4.3). dilakukan dengan metode beda hingga dimana variabel-variabel dari persamaan tersebut dihitung pada deretan grid ruang.

Metoda semi implisit 2 langkah yang dimaksud dalam perhitungan ini adalah menyelesaikan persamaan model dengan metode beda hingga implisit untuk perhitungan elevasi (ζ) dan metode eksplisit untuk perhitungan kecepatan (U dan V).

Sistem persamaan linier yang terbentuk untuk menghitung elevasi pada tingkat waktu ke $n+1$ diselesaikan dengan metode iteratif SOR (Successive over Relaxation) dengan harga optimal (parameter relaksasi) antara $0 < \omega < 2$. Harga elevasi dan kecepatan merupakan harga rata-rata pada langkah waktu ke n dan $n+1$.

Perhitungan harga elevasi dan kecepatan dalam dua langkah berfungsi untuk meredam dan menghindari ketidakstabilan akibat adanya gelombang kejut (shock waves) selama perhitungan komputasi.

Metode semi implisit untuk menyelesaikan persamaan hidrodinamika didasarkan dari ide perata-rataan waktu menurut pendekatan *Crank-Nicholson* yang diaplikasikan untuk model integrasi dua tingkat waktu. Perata-rataan ini melibatkan tingkat "waktu sekarang" (n) dan "waktu selanjutnya" ($n+1$). Pada metode implisit biasa, penggunaan dua tingkatan waktu ini mengakibatkan adanya kasus peredaman amplitudo.

Dengan demikian, sifat metode semi-implisit dua langkah ini adalah netral. Pola aliran yang sangat dipengaruhi efek suku non linier yang dapat menimbulkan gelombang kejut (*shock wave*) akan dapat distabilkan. Ide dasar metode semi implisit ini adalah mengeliminasi besaran U dan V dalam persamaan kontinuitas pada waktu ($n+1$) untuk mendapatkan sistem persamaan linier (SPL) dalam ζ (tinggi muka air) Caranya adalah :

- memasukkan persamaan gerak ke dalam suku divergensi
- mereduksi persamaan kontinuitas menjadi SPL untuk fungsi skalar ζ
- skema implisit ζ diselesaikan secara implisit
- skema implisit untuk u dan v diselesaikan secara eksplisit

Persamaan hidrodinamika (4.1), (4.4), dan (4.3) dapat disederhanakan sebagai berikut :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} = T(u) - \tau_b^x \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} = T(v) - \tau_b^y \quad (4.8)$$

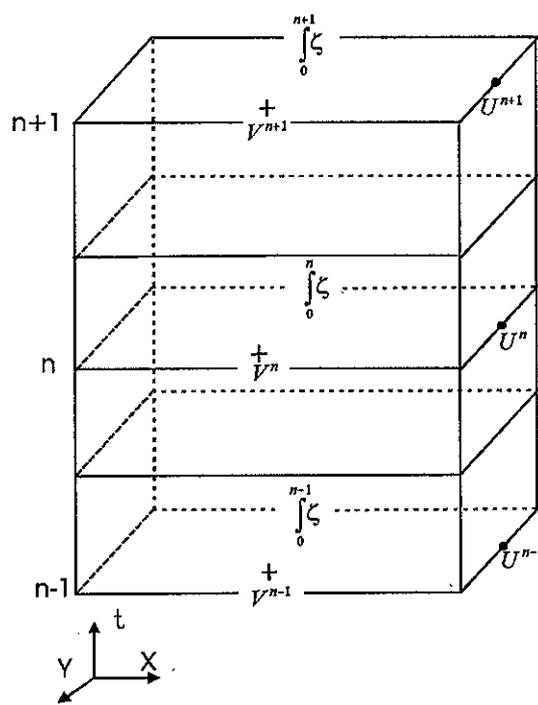
$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (4.9)$$

dimana :

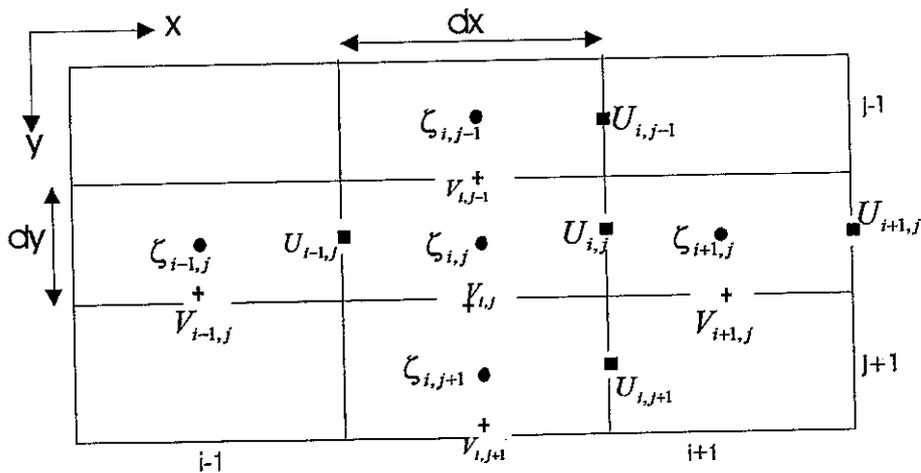
τ_b^x =Komponen tegangan gesekan dasar (gaya disipasi) arah sumbu x (Nm²)

τ_b^y = Komponen tegangan gesekan dasar (gaya disipasi) arah sumbu y (Nm²)

T(U) dan T(V) menyatakan kumpulan suku-suku diluar gradien tekanan dan gesekan (suku konventif saja yang ditinjau)



Gambar 4.3. Kasa Richardson dalam dimensi bidang XY dan waktu U,V dan ζ yang terletak pada tingkat waktu yang sama



Gambar 4.4. Skema kasa Richardson 2 dimensi

ζ dan U berada pada lintang yang sama

ζ dan V berada pada bujur yang sama.

Suku-suku gradien tekanan ($\frac{\partial \zeta}{\partial x}$ dan $\frac{\partial \zeta}{\partial y}$) dan suku-suku transport

($\frac{\partial U}{\partial x}$ dan $\frac{\partial V}{\partial y}$) dalam ketiga persamaan model didiskretisasi secara beda

pusat terhadap waktu. Suku-suku lainnya yang berupa turunan terhadap waktu didiskretisasi secara selisih maju dan turunan terhadap ruang didiskretisasi secara selisih mundur. Suku-suku lainnya diselesaikan secara eksplisit.

Diskretisasi suku pertama secara beda maju terhadap waktu menjadi :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{U^{n+1} - U^n}{\Delta t} \dots\dots\dots(4.4)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{V^{n+1} - V^n}{\Delta t} \dots\dots\dots(4.5)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{\zeta^{n+1} - \zeta^n}{\Delta t} \dots\dots\dots(4.6)$$

Suku konvektif didiskretisasi secara beda pusat :

$$\frac{U}{H} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{V}{H} \frac{\partial U}{\partial y} = \left\{ \bar{U}^n \frac{(U_{i+1} - U_{i-1})^n}{\Delta x} + \bar{V}^n \frac{(U_{j-1} - U_{j+1})^n}{\Delta y} \right\} / (H + H_{i+1})^n \dots\dots\dots(4.7)$$

$$\frac{U}{H} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{V}{H} \frac{\partial U}{\partial y} = \left\{ \bar{U}^n \frac{(V_{i+1} - V_{i-1})^n}{\Delta x} + \bar{V}^n \frac{(V_{j-1} - V_{j+1})^n}{\Delta y} \right\} / (H + H_{j+1})^n \dots\dots\dots(4.8)$$

Harga kecepatan rata-rata dipengaruhi oleh empat sel disekitarnya :

$$\bar{U} = 0,25(U_{i-1} + U + U_{j+1} + U_{i-1,j+1})^n$$

$$\bar{V} = 0,25(V_{j-1} + V + V_{i+1} + V_{i+1,j-1})^n$$

suku gradien tekanan didiskretisasi secara beda pusat terhadap waktu menjadi :

$$gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} = \frac{1}{2} g(H + H_{i+1})^n [\zeta_{i+1}^{n+1} - \zeta^{n+1} + \zeta_{i+1} - \zeta] / 2\Delta x \dots\dots\dots(4.9)$$

$$gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} = \frac{1}{2} g(H + H_{j+1})^n [\zeta^{n+1} - \zeta_{j+1}^{n+1} + \zeta_{i+1} - \zeta] / 2\Delta y \dots\dots\dots(4.10)$$

Suku transport pada persamaan kontinuitas didiskretisasi secara selisih pusat :

$$\frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial U}{\partial x} = \left\{ \frac{(V_{j-1} - V)^{n+1} + (V_{j-1} - V)^n}{2\Delta y} \right\} + \left\{ \frac{(U^{n+1} - U_{i+1}^{n+1} + U^n - U_{i+1}^n)}{2\Delta x} \right\} \dots\dots(4.11)$$

Pendiskretan suku gesekan dasar dinyatakan dalam bentuk kwadratis :

$$r \frac{U}{H^2} \sqrt{(U^2 + V^2)} = 4r \frac{U^{n+1}}{(H + H_{i+1})^2} (\sqrt{U^2 + \bar{V}})^n \dots\dots\dots(4.12)$$

$$r \frac{U}{H^2} \sqrt{(U^2 + V^2)} = 4r \frac{V^{n+1}}{(H + H_{j+1})^2} (\sqrt{\bar{U} + V^2})^n \dots\dots\dots(4.13)$$

Kemudian dengan metoda implisit dan eksplisit maka persamaan (4.1), (4.2) dan persamaan (4.3) yang didiskretisasi menghasilkan sistem persamaan beda hingga sebagai berikut :

$$U_{i,j}^{n+1} = RF(U)_{i,j}^n [U_{i,j}^n + \Delta t \{ T(U)_{i,j}^n - gH(U)_{i,j}^n (\zeta_{i+1,j}^{n+1} - \zeta_{i,j}^{n+1} + \zeta_{i+1,j}^n - \zeta_{i,j}^n) / 2\Delta x \}] \dots(4.14)$$

$$V_{i,j}^{n+1} = RF(V)_{i,j}^n [V_{i,j}^n + \Delta t \{ T(V)_{i,j}^n - gH(V)_{i,j+1}^n (\zeta_{i,j+1}^{n+1} - \zeta_{i,j}^{n+1} + \zeta_{i,j+1}^n - \zeta_{i,j}^n) / 2\Delta y \}] \dots(4.15)$$

Suku RF(U) dan RF(V) mewakili suku gesekan dalam rumus kwadratis. Dalam penelitian ini hanya ditinjau suku gesekan dasar. Pemilihan formula gesekan dasar tersebut digunakan untuk kestabilan numerik.

Harga elevasi pada tingkat waktu ke n+1 diperoleh dengan formula :

$$\zeta_{i,j}^{n+1} = \zeta_{i,j}^n - \Delta t \left[\frac{(U_{i,j}^{n+1} - U_{i-1,j}^{n+1} + U_{i,j}^n - U_{i-1,j}^n)}{2\Delta x} + \frac{(V_{i,j-1}^{n+1} - V_{i,j}^{n+1} + V_{i,j-1}^n - V_{i,j}^n)}{2\Delta y} \right] \dots\dots\dots(4.16)$$

Perhitungan kecepatan akhir pada tingkat waktu ke $n+1$ dilakukan dengan mensubstitusikan harga elevasi persamaan (4.16) kedalam pers.(4.14) dan (4.15).

Kemantapan/Stabilitas Numerik.

Secara teoritis harga pasti persamaan differensial dapat dihitung dari pendekatan selisih hingga, tetapi pada kenyataannya harga pasti ini tidak dapat dihitung. Hal ini disebabkan adanya kesalahan waktu memasukan harga awal dan kesalahan pembulatan perhitungan kesalahan ini harus diusahakan agar tidak menjadi besar, berkaitan dengan hal tersebut maka diperlukan adanya kriteria kestabilan. Dalam penelitian ini kriteria yang digunakan adalah kriteria stabilitas untuk model dua dimensi yaitu sebagai berikut :

$$\Delta t = \frac{\Delta L}{\sqrt{2gH_{\max}}} \quad \Longrightarrow \quad \Delta L = \text{MIN} [\Delta x, \Delta y]$$

$$H_{\max} = \text{MAX} (D + \zeta)$$

Catatan :

topografi : setiap titik ζ kering dikelilingi oleh 4 titik kasa transport kering (pulau yang sekecil mungkin)

Difinisi darat, pantai : $H = D + \zeta \equiv 0$

Tentukan $\Delta x = \Delta y = 50$ meter , $H_{\max} = 11,50$ meter

$$\Delta t = \frac{50}{\sqrt{2 * 9.81 * 11,50}} = 15,02 \text{ detik} \Rightarrow \text{untuk kestabilan numerik interval waktu}$$

diambil = 15 detik

b. Persamaan Transpor Dengan Metode QUICKEST

Adapun secara singkat metode yang dikembangkan dan digunakan untuk penyelesaian numerik tersebut diuraikan pada penjelasan berikut.

Penyebaran (dispersi) zat/material sedimen tersuspensi disebabkan oleh gabungan proses advectif (oleh arus), difusi turbulen. Persamaan model secara 2 dimensi (x,y) perata-rataan vertikal sebagai berikut :

$$\frac{\partial}{\partial t} (C) + \frac{\partial}{\partial x} (UC) + \frac{\partial}{\partial y} (VC) = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \dots \dots \dots (4.17)$$

Persamaan (4.17) diselesaikan dengan metode QUICKEST sebagai berikut :

$$\frac{C^{n+1} - C^n}{\Delta t} = \frac{(uC)_l^n - (uC)_r^n}{\Delta x} + \frac{(vC)_t^n - (vC)_b^n}{\Delta x} + \frac{\left(Dx \frac{\partial C}{\partial x}\right)_l^n - \left(Dx \frac{\partial C}{\partial x}\right)_r^n}{\Delta x} + \frac{\left(Dy \frac{\partial C}{\partial y}\right)_t^n - \left(Dy \frac{\partial C}{\partial y}\right)_b^n}{\Delta y} \dots (4.18)$$

Uraian dari suku-suku persamaan (4.18) tersebut di atas adalah sebagai berikut

Suku adveksi arah x = (u_{ij} C_{r,j})

Dimana:

$$C_{r,j} = C_{LIN} - Cr Grad_r \frac{\Delta x}{2} + \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{1}{6} + \frac{1}{6} Cr^2\right) CURV_r \Delta x^2$$

$$C_{LIN} = \frac{C_{i,j} + C_{i+1,j}}{2}, C_r = \frac{u_{i,j} \Delta t}{\Delta x}, \alpha = Dx \frac{\Delta t}{\Delta x^2}, Grad_r = \frac{C_{i+1,j} - C_i}{\Delta x}$$

$$CURV_r = C_{i+1,j} - 2 C_{i,j} + C_{i-1,j}, \text{ jika } u_{ij} > 0$$

$$CURV_r = C_{i+2,j} - 2 C_{i+1,j} + C_{i,j}, \text{ jika } u_{ij} < 0$$

Suku adveksi arah y = (v_{ij} C_{i,b})

Dimana :

$$C_{i,b} = C_{LIN} - Cb Grad_b \frac{\Delta y}{2} + \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{1}{6} + \frac{1}{6} Cb^2\right) CURV_b \Delta y^2$$

$$C_{LIN} = \frac{C_{i,j} + C_{i,j+1}}{2}, Cb = \frac{v_{i,j} \Delta t}{\Delta y}, \alpha = Dy \frac{\Delta t}{\Delta y^2}, Grad_b = \frac{C_{i,j} - C_{i,j+1}}{\Delta y}$$

$$CURV_b = C_{i,j} - 2 C_{i,j+1} + C_{i,j+2}, \text{ jika } v_{ij} > 0$$

$$CURV_b = C_{i,j+1} - 2 C_{i,j} + C_{i,j-1}, \text{ jika } v_{ij} < 0$$

4.3.3. Desain Model

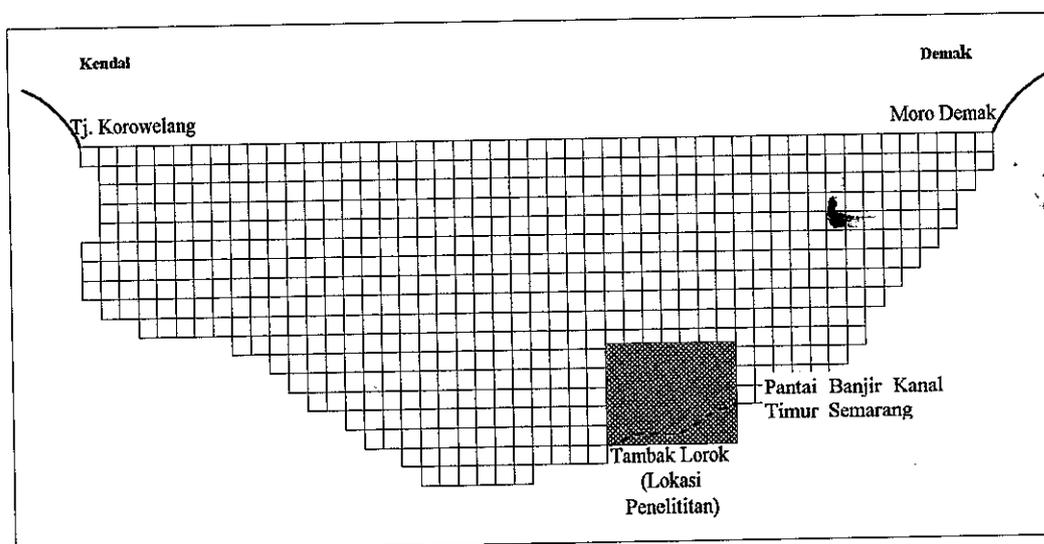
Desain model yang diterapkan mengacu pada bentuk model besar dan model kecil sebagai berikut :

a. Model Besar.

Data elevasi dan komponen yang diperoleh adalah data pada stasiun Kendal (Tanjung Korowelang) dan Demak (Morodemak). Untuk menentukan elevasi muka laut pada lokasi penelitian, terlebih dahulu dilakukan simulasi model dengan lokasi yang lebih besar, dengan tujuan agar supaya daerah Kendal dan daerah Demak bisa tercakup dalam satu model. Model ini disebut sebagai model besar.

Model besar dibatasi sebelah utara pada lintang $6^{\circ}50'15''$ S yang di sebelah timur bertepatan dengan muara kali Demak, Kabupaten Demak dan di sebelah barat dengan muara kali Buangan (sebelah barat kali Bodri, Tanjung Korowelang), Kabupaten Kendal. Ukuran grid yang digunakan adalah $\Delta x = \Delta y = 500$ m, sehingga untuk model besar ini total grid yang digunakan adalah 70×25 grid. Luas daerah tinjauan adalah $35,0$ km x $12,5$ km atau $43,5$ km². Sketsa model besar dapat dilihat pada Gambar 4.5.

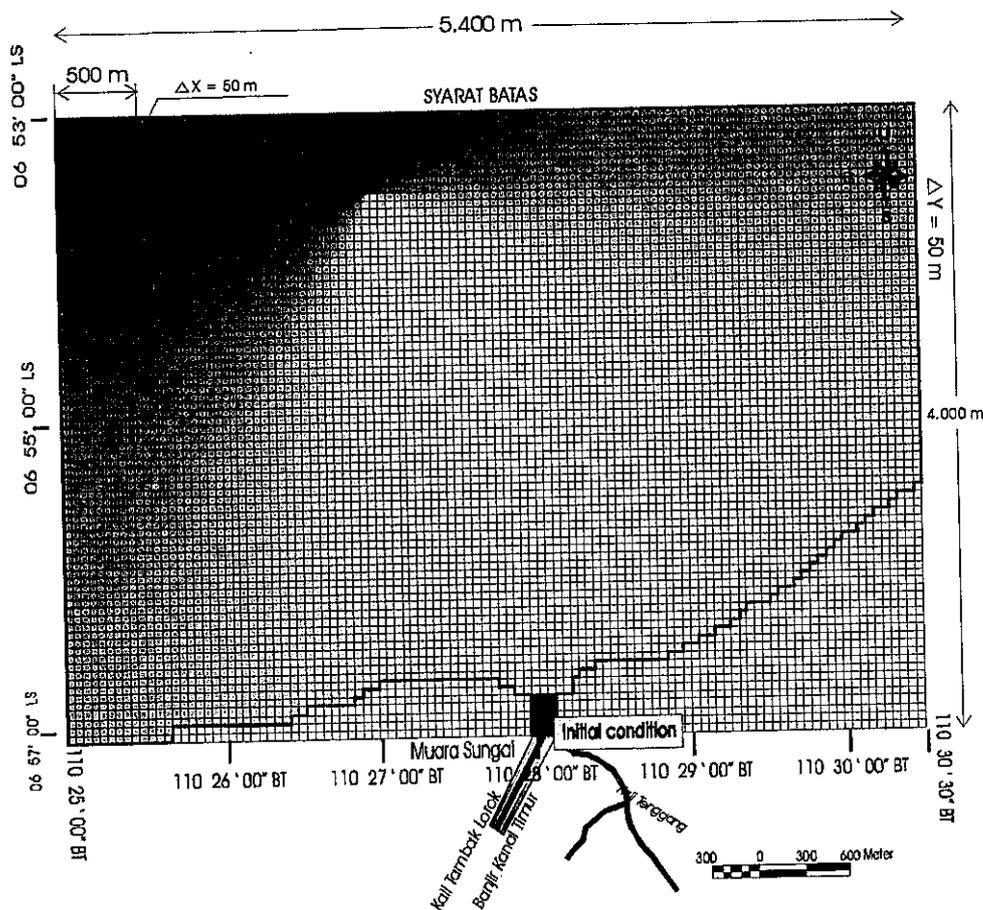
Hasil simulasi yang dilakukan pada model besar adalah elevasi di tiap grid, termasuk grid yang menjadi batasan daerah penelitian. Elevasi tersebut dicuplik untuk dijadikan syarat batas model kecil.



Gambar 4.5. Sketsa model besar dan daerah cuplikan model kecil.

b. Model Kecil

Model kecil yang diambil merupakan seperlima bagian dari model besar dan terfokus di muara sungai Banjir Kanal Timur, yang merupakan gabungan dari tiga sistem sungai yaitu : Tambak Lorok, Banjir Kanal Timur, dan Tenggara). Batas utara berada ± 4 km dari muara sungai, sedang batas barat berada di tengah kolam sampai ke utara. Batas timur tidak tepat di pantai, tetapi berjarak $\pm 5,4$ km dari batas barat. Sedangkan batas selatan berupa daratan. Ukuran grid yang digunakan adalah $\Delta x = \Delta y = 50$ m, sehingga untuk model kecil ini total grid yang digunakan adalah 108×80 grid. Luas daerah kajian adalah $21,6 \text{ km}^2$. Mengingat daerah kajian berada di sebelah timur kolam pelabuhan, maka di sebelah selatan dibatasi oleh muara sungai. Sedang kolam pelabuhan pada bagian dermaga penumpang dan barang tidak ikut dimasukkan dalam model kecil.



Gambar 4.6. Sketsa Model kecil (domain dan Initial condition)

4.3.4. Skenario Simulasi

a. Skenario Hidrodinamika

Skenario hidrodinamika dilakukan dengan mensimulasikan model dengan menggunakan gaya pembangkit arus yang disebabkan oleh pengaruh gelombang pasang surut (arus pasang surut). Data pasut diperoleh dari hasil ramalan .

b. Skenario Transpor .

Skenario ini dilakukan dengan mensimulasikan model Dispersi sedimen tersuspensi pada persamaan transpor (4.17) .

Nilai awal yang diterapkan pada simulasi model hidrodinamika, adalah nol untuk elevasi dan kecepatan di semua grid. Syarat batas yang diterapkan pada model besar di batas terbuka adalah elevasi hasil interpolasi peramalan pasut di dua lokasi yaitu Demak dan Kendal ($\eta=\eta(t)$) dan $\partial u/\partial n = 0$. Selanjutnya untuk model kecil diberikan syarat batas elevasi hasil running model besar dimana $\eta=\eta(t)$ dan $\partial u/\partial n = 0$. Sistem ini dikenal juga dengan teknik sarang. Sedangkan pada syarat batas tertutup (darat) dengan menerapkan kecepatan arah normalnya sama dengan nol ($V_n = 0$) dan $\partial \eta/\partial n = 0$. Pada muara sungai diperlakukan sebagai outlet yang debitnya konstan.

Untuk model transpor pada kondisi awal simulasi, konsentasi awal di perairan yang diberikan adalah sebagai berikut :

nilai awal = 0,3646 gr/l adalah nilai terendah konsentrasi sedimen tersuspensi di perairan daerah penelitian pada saat pengambilan data serempak di lapangan (tanggal 19 - 20 Oktober 2003).

4.3.5. Syarat Batas.

- Syarat batas tertutup antara laut dan daratan diberikan dengan asumsi aliran semi-slip dan tidak ada fluks difusi yang dinyatakan sebagai berikut :

$$\left[K \frac{\partial C}{\partial n} \right]_b = 0 \dots\dots\dots(4.19)$$

dimana b adalah batas darat laut, sedangkan n adalah komponen vektor normal batas darat, sehingga dapat dirumuskan sebagai $C_{b+1} = C_b$.

- Syarat batas terbuka yang merupakan batas antara domain laut yang ditinjau dengan perairan sekitarnya, menggunakan syarat batas kontinuatif dengan persamaan berikut

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial UC}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (4.20)$$

Secara numerik dapat ditulis sebagai berikut :

$$C_b^{n+1} - C_b^n = \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(U_b^n C_b^n - U_{b-1}^n C_{b-1}^n \right) \quad \text{untuk } U_b > 0$$

$$C_b^{n+1} - C_b^n = \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(U_b^n C_{b+1}^n - U_{b-1}^n C_b^n \right)$$

dimana : $C_{b+1} = C_b$ untuk $U_b < 0$

Dimana C adalah konsentrasi sedimen tersuspensi.

- Syarat batas di muara sungai dengan memberikan kondisi debit sungai dan beberapa konsentrasi tersebut sebagai input. Debit sungai diambil dari rerata bulanan debit Banjir Kanal Timur selama 5 tahun (1993 – 1997) pada bulan Oktober yaitu 2,3 m³/dt.

4.3.6. Data Masukan Sumber.

Untuk data masukan sumber pada model transpor sedimen digunakan data pengamatan di muara (Stasiun S1) sungai secara rata-rata dalam 1 hari yang diperoleh dari data time series tiap 1 jam selama 24 jam pada waktu pengamatan , sebesar 1,9503 gr/l.

4.3.7. Verifikasi Model.

Verifikasi model adalah proses membandingkan data lapangan dan hasil simulasi menggunakan cara statistik. Data lapangan pada proses verifikasi ini bukan data lapangan yang digunakan pada proses kalibrasi. Dalam proses verifikasi ini, hanya dilihat sejauh mana kemiripan hasil simulasi terhadap data lapangan yang lain. Pada proses ini, koefisien-koefisien yang terdapat dalam model tidak lagi diubah. Seperti halnya pada kalibrasi, metode statistik yang

dapat digunakan pada proses verifikasi model antara lain adalah Rata-Rata Kesalahan Relatif (Mean Relative Error / MRE).

Untuk proses kalibrasi, metode statistika yang digunakan adalah Rata-Rata Kesalahan Relatif (Mean Relative Error / MRE) menggunakan rumus sebagai berikut :

$$RE = \frac{|X - C|}{X} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots(4.21)$$

$$MRE = \sum_0^n \frac{RE}{n} \quad \dots\dots\dots(4.22)$$

dimana :

- RE = Relative Error
- MRE = Mean Relative Error
- C = data hasil simulasi
- X = data lapangan
- n = jumlah data

BAB V.
HASIL DAN PEMBAHASAN .

5.1. Hasil Pengamatan Lapangan Dan Hasil Simulasi Model

Data berbagai konsentrasi sedimen tersuspensi dari hasil pengamatan lapangan dan hasil simulasi model selengkapnya tersaji pada Tabel berikut :

Tabel 5.1.Konsentrasi sedimen tersuspensi hasil pengamatan lapangan di stasiun 1 s/d stasiun 20

| STASIUN PENGAMATAN | PENGAMATAN LAPANGAN (konsentrasi gr/l) | HASIL SIMULASI MODEL (konsentrasi gr/l) |
|-----------------------|--|---|
| Sta. 1 | 1,9503 | - |
| Sta. 2 | 1,2652 | 0,6452 |
| Sta. 3 | 1,0000 | 0,6374 |
| Sta. 4 | 1,1326 | 0,6278 |
| Sta. 5 | 1,0000 | 0,6208 |
| Sta. 6 | 0,6160 | 0,5867 |
| Sta. 7 | 0,8702 | 0,5851 |
| Sta. 8 | 0,7431 | 0,5813 |
| Sta. 9 | 0,8702 | 0,5811 |
| Sta.10 | 0,5820 | 0,5408 |
| Sta.11 | 0,6160 | 0,5430 |
| Sta.12 | 0,6160 | 0,5457 |
| Sta.13 | 0,6160 | 0,5487 |
| Sta.14 | 0,3646 | 0,5081 |
| Sta.15 | 0,4889 | 0,5164 |
| Sta.16 | 0,4889 | 0,5205 |
| Sta.17 | 0,4982 | 0,5142 |
| Sta.18 | 0,8702 | - |
| Sta.19 | 1,1326 | - |
| Sta.20 | 0,8902 | - |

Keterangan.

S1 : sebagai nilai awal konsentrasi sedimen tersuspensi dalam simulasi.

Sta.18,Sta19, Sta 20 Hasil Pengamatan diluar domain penelitian (lihat gambar 4.2.)

5.2. Verifikasi Elevasi Muka Air

Verifikasi elevasi muka air di Perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang hanya dilakukan untuk satu lokasi yaitu di Tambak Lorok Semarang yang terletak pada stasiun S1, dengan menggunakan data pengamatan lapangan dan hasil ramalan pasut yang komponennya diperoleh dari hasil penelitian sebelumnya (Tim UrgeBatch III) Gambar L-B2.

Verifikasi antara hasil model dengan hasil ramalan menunjukkan kesesuaian fasa yang cukup baik, dengan perbedaan maksimum magnitudo elevasi $\pm 0,1$ meter (Gambar L-B3). Sedangkan verifikasi antara hasil model dengan data pengamatan lapangan juga menunjukkan kesesuaian fasa dengan perbedaan magnitudo elevasi yang bervariasi antara 0,1 – 0,2 meter (Gambar L-B4).

5.3. Verifikasi Arus Pasang Surut .

Hasil verifikasi komponen kecepatan arah U dan V arus pasang surut dengan data pengamatan lapangan (Musim Hujan) di stasiun C1 tersaji pada Gambar L-B5 dan Gambar L-B6. Verifikasi antara hasil simulasi model dengan komponen kecepatan arus pasut dari data arus menunjukkan bahwa pada saat tertentu menunjukkan kesesuaian fasa tiap-tiap komponen (U dan V) namun magnitudonya bervariasi.

Dari hasil tersebut terlihat bahwa hasil model belum menunjukkan pola dan magnitudo yang sesuai dengan data pengamatan lapangan. Hal ini disebabkan oleh berbagai faktor pembangkit arus yang tidak ditinjau pada model ini, salah satunya adalah gelombang yang dapat menyebabkan arus sejajar pantai (*longshore current*).

Hasil simulasi arus pasang surut untuk model besar dan model kecil yang dicuplik berdasarkan kondisi pasang surut (Gambar L-B10 – Gambar L-B11) : PPN, PSN, SSN, SPN, PPS, PSS, SSS, dan SPS selengkapnya tersaji pada Tabel 5.2. berikut :

Tabel 5.2. Hasil Simulasi Model Pola Arus Pasang Surut di Lokasi Penelitian

| Kondisi Pasang Surut | Arah dari | Arah ke | Kisaran Magnitudo |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| PPN (Pasang Tertinggi Perbani) | timur / timur laut | barat / barat laut | 0,05 - 0,22 |
| PSN (Pasang Menuju Surut Perbani) | timur / timur laut | barat / barat laut | 0,01 - 0,20 |
| SSN (Surut Terendah Perbani) | barat / barat laut | timur / timur laut | 0,03 - 0,21 |
| SPN (Surut Menuju Pasang Perbani) | barat / barat laut | timur / timur laut | 0,01 - 0,15 |
| PPS (Pasang Tertinggi Purnama) | timur / timur laut | barat / barat laut | 0,05 - 0,25 |
| PSS (Pasang Menuju Surut Purnama) | timur / timur laut | barat / barat laut | 0,02 - 0,23 |
| SSS (Surut Terendah Purnama) | barat / barat laut | timur / timur laut | 0,03 - 0,23 |
| SPS (Surut Menuju Pasang Purnama) | barat / barat laut | timur / timur laut | 0,01 - 0,17 |

Gambaran pola arus pasang surut baik model besar maupun model kecil selengkapnya tersaji pada Gambar L-B9 - Gambar L-B24.

Dari Tabel 5.2 dan gambar yang tersaji, terlihat pola arus yang pergerakannya didominasi arah timur/timur laut dan barat/barat laut baik untuk simulasi model besar maupun model kecil. Pola pergerakan arus yang demikian disebabkan oleh gaya pembangkit arus yang bekerja pada model hanyalah pasang surut atau perbedaan muka air, dimana terdapat perbedaan tinggi elevasi antara dua lokasi yang menjadi nilai batas model besar yaitu lokasi Kendal dan Demak (Gambar L-B7 – Gambar L-B8).

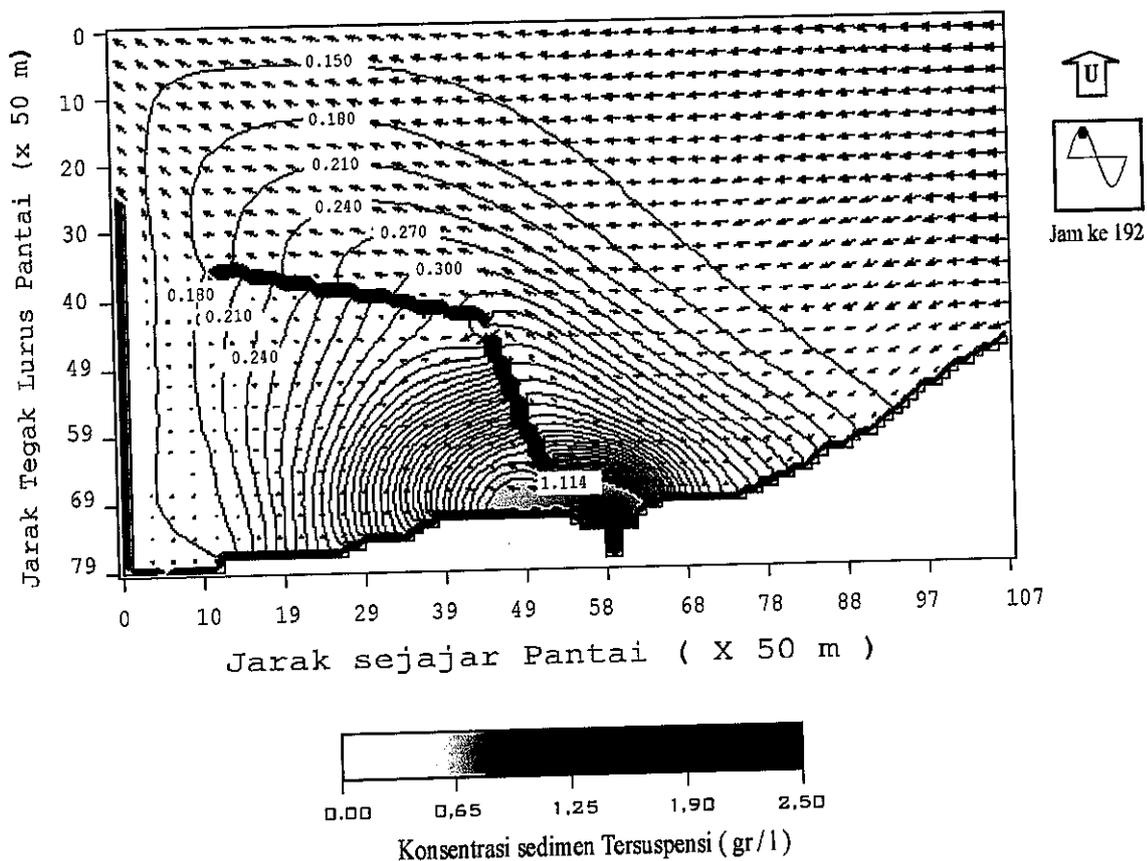
Pada saat pasang tertinggi baik saat perbani maupun purnama elevasi di lokasi Demak (timur) lebih tinggi dari Kendal (barat), akibatnya arus bergerak dari Demak (timur/timurlaut) ke Kendal (barat/baratlaut), demikian juga pada saat pasang menuju surut. Sedangkan pada saat surut terendah baik saat perbani maupun purnama elevasi di lokasi Demak (timur) lebih rendah dari Kendal (barat), akibatnya arus bergerak dari Kendal (barat/baratlaut) ke Demak (timur/timurlaut), demikian juga pada saat surut menuju pasang. Hal yang sama juga terjadi pada simulasi model kecil, karena nilai batas diambil dari simulasi model besar.

5.4. Model Dispersi Sedimen tersuspensi 2 - Dimensi

Pola dispersi konsentrasi sedimen tersuspensi, dilakukan berdasarkan kondisi pasut dengan pergerakan arus pasut yang mewakili polanya selama simulasi yaitu barat/barat laut dan timur/timur laut.

a. Pada Saat Pasang Tertinggi Perbani (PPN).

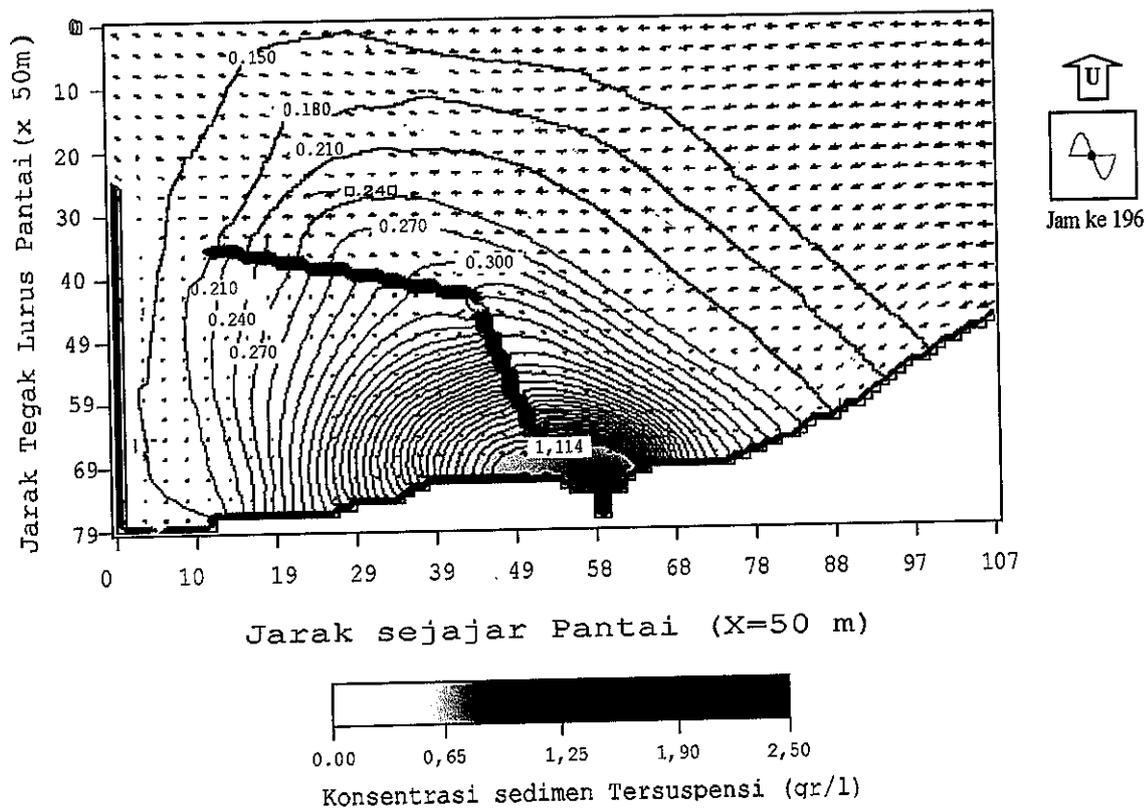
Dari gambar 5.1. hasil simulasi model dispersi konsentrasi sedimen tersuspensi pada saat pasang tertinggi perbani (PPN), terlihat bahwa pola penyebaran konsentrasi sedimen tersuspensi menunjukkan pola yang sama dengan pola pergerakan arus pasang surut, dimana pada saat pasang tertinggi perbani (PPN) pola dispersi konsentrasi sedimen tersuspensi cenderung menyebar ke arah barat/barat laut.



Gambar 5.1. Hasil simulasi model dispersi konsentrasi sedimen tersuspensi Pada Saat Pasang Tertinggi Perbani (PPN)

b. Pada Saat Pasang Menuju Surut Perbani (PSN).

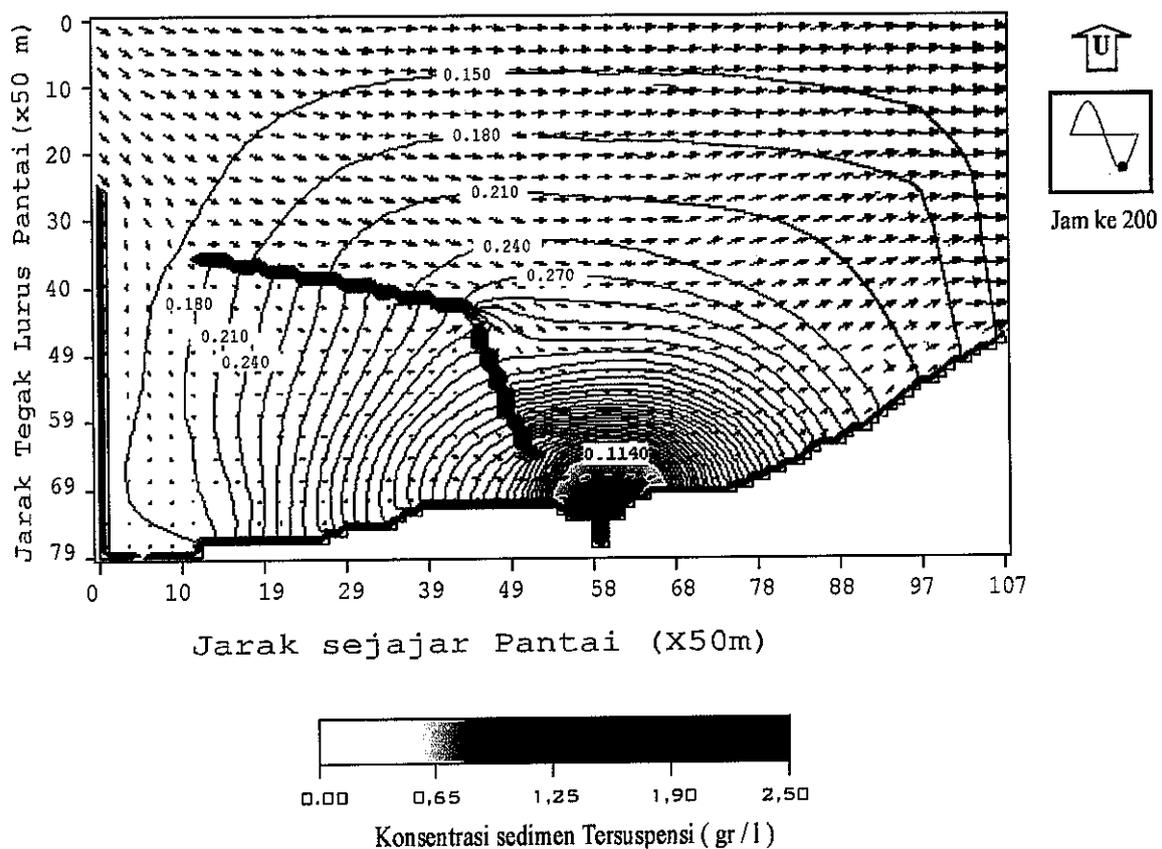
Dari gambar 5.2. hasil simulasi model dispersi konsentrasi sedimen tersuspensi (Jam ke 196) yaitu pada saat pasang menuju surut perbani (PSN), terlihat bahwa pola penyebaran konsentrasi sedimen tersuspensi menunjukkan pola yang sama dengan pola pergerakan arus pasang surut, dimana pada saat pasang menuju surut perbani (PSN) pola dispersi konsentrasi sedimen tersuspensi cenderung berubah arah sesuai dengan pola pasang surut yaitu cenderung menyebar ke arah timur/timur laut.



Gambar 5.2. Hasil Simulasi Model Dispersi Sedimen Tersuspensi Pada Saat Pasang menuju Surut Perbani (PSN)

c. Pada Saat Surut Terendah Perbani (SSN).

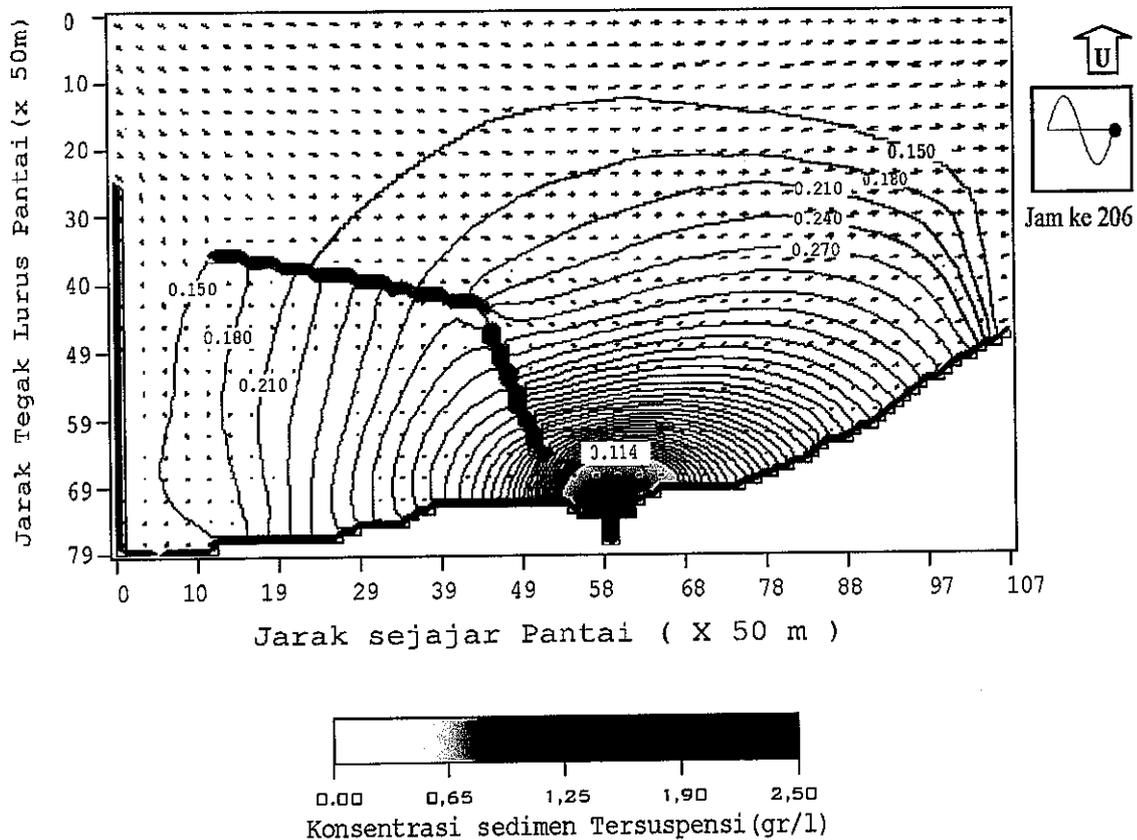
Dari gambar 5.3 tampak bahwa hasil simulasi model dispersi konsentrasi sedimen tersuspensi (Jam ke 200) yaitu pada saat pasang menuju surut terendah perbani (SSN) terlihat bahwa pola dispersi konsentrasi sedimen tersuspensi menunjukkan pola yang sama dengan pola pergerakan arus pasang surut, dimana pada saat surut terendah perbani (SSN) pola dispersi konsentrasi sedimen tersuspensi cenderung mulai bergerak ke arah timur .



Gambar 5.3. Hasil Simulasi Model Dispersi Sedimen tersuspensi Pada Saat Surut Terendah Perbani (SSN)

d. Pada Saat Surut Menuju Pasang Perbani (SPN).

Pada gambar 5.4. tampak bahwa pada saat surut menuju pasang perbani (SPN) pola dispersi konsentrasi sedimen tersuspensi pada jam ke 206 (hasil simulasi) cenderung ke arah timur/timur laut yang sesuai dengan pola pasang surut yaitu menyebar ke arah timur/timur laut.



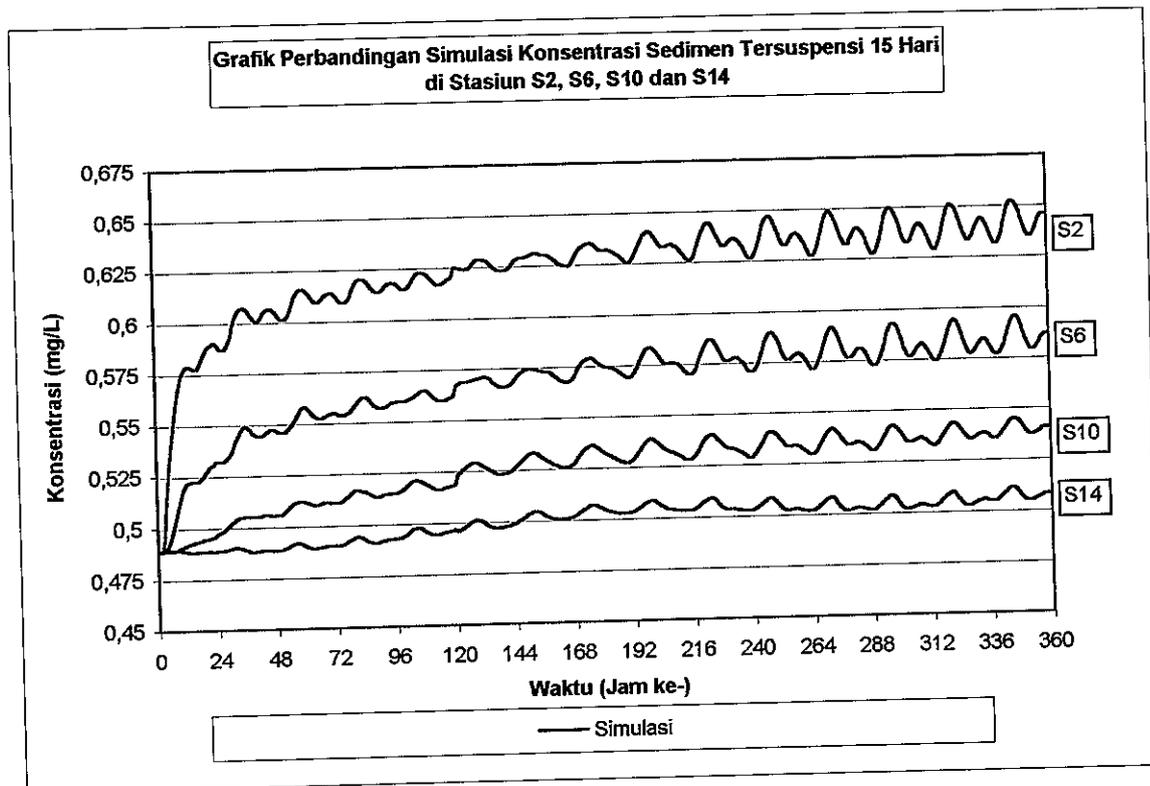
Gambar 5.4. Hasil Simulasi Model Dispersi Sedimen tersuspensi
Pada Saat Surut Menuju Pasang Perbani (SPN)

5.5. Hasil Simulasi Konsentrasi Sedimen Terhadap Waktu dengan Nilai Seragam.

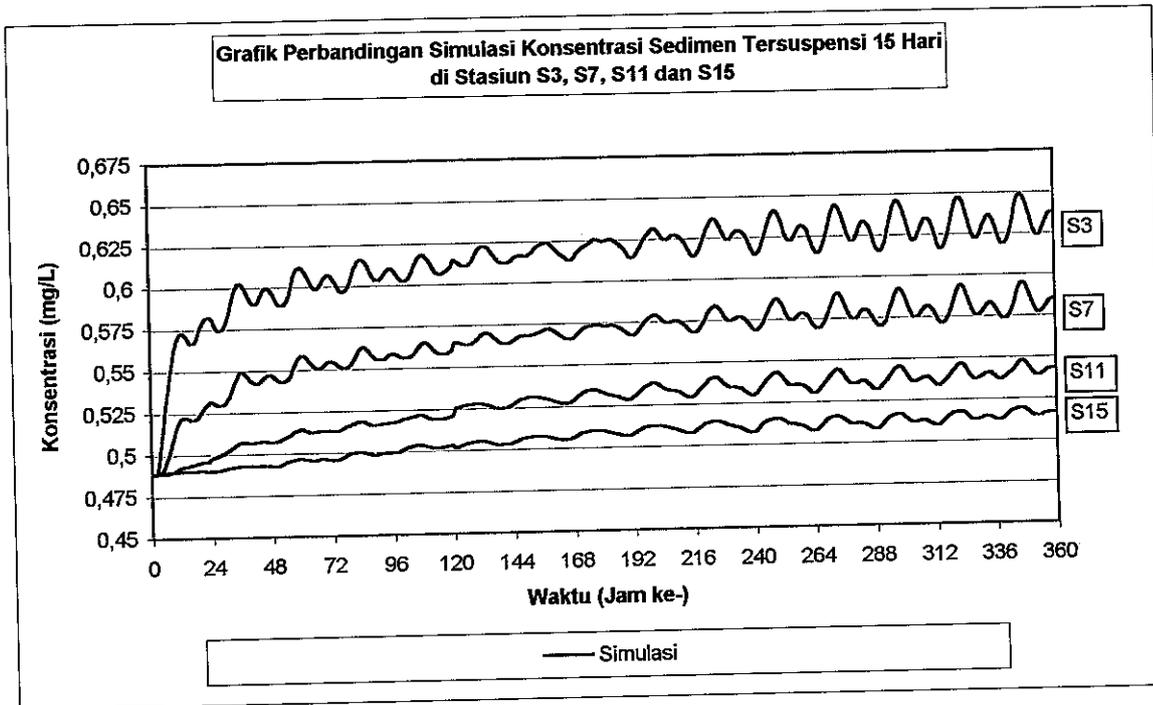
Pada stasiun S2,S3,S4, S5 Konsentrasi sedimen tersuspensi hasil simulasi pada jam ke 2 sampai dengan jam ke 16 ,konsentrasi sedimen tersuspensi mengalami kenaikan konsentrasi tanpa ada penurunan konsentrasi (jam ke - 2 = 0,4884 gr/l. Jam ke 16 = 0,577 gr/l).

Dari Gambar 5.5. – 5.8. terlihat bahwa konsentrasi Sedimen tersuspensi di suatu tempat (stasiun) mengalami perubahan konsentrasi sejalan dengan pertambahan waktu simulasi.

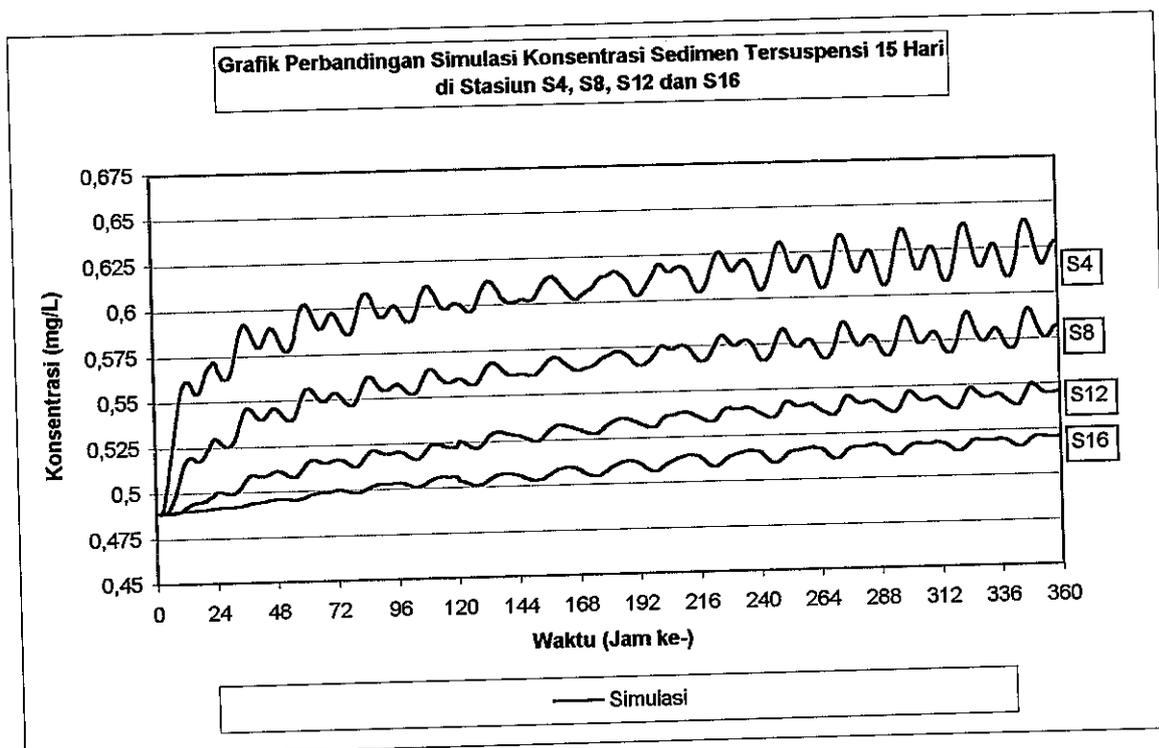
Konsentrasi sedimen tersuspensi menunjukkan perlakuan bahwa semakin jauh dari sumber konsentrasinya menjadi semakin kecil. pada stasiun yang paling dekat dari sumber (S2, S3, S4, dan S5) menunjukkan besarnya konsentrasi maximum antara 0,6320gr/l – 0,6497gr/L . pada stasiun yang paling jauh dari sumber (S14, S15, S16, dan S17) menunjukkan besarnya konsentrasi antara 0,5113gr/l – 0,5089 gr/L .



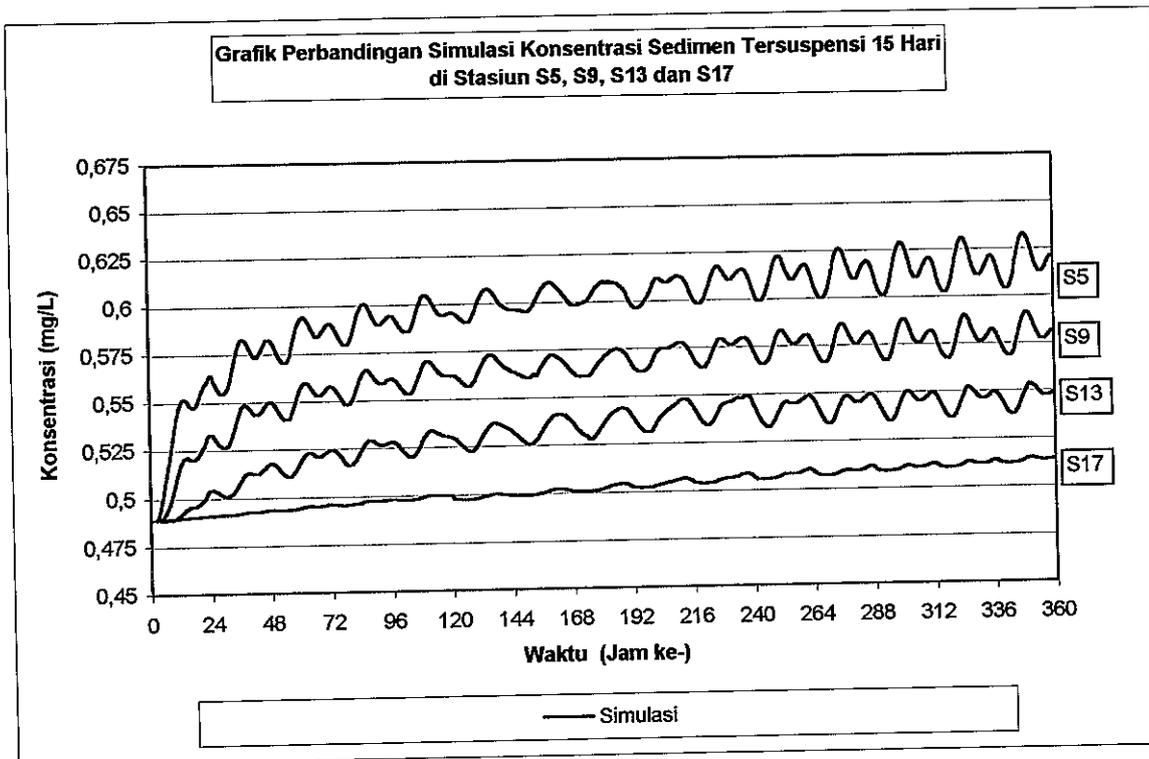
Gambar 5.5. Hasil Simulasi Konsentrasi Sedimen Tersuspensi Terhadap Waktu di Stasiun S2,S6,S10,dan S14 dengan Nilai awal Seragam



Gambar 5.6. Hasil Simulasi Konsentrasi Sedimen Tersuspensi Terhadap Waktu di Stasiun S3,S7,S11,dan S15 dengan Nilai awal Seragam



Gambar 5.7. Hasil Simulasi Konsentrasi Sedimen Tersuspensi Terhadap Waktu di Stasiun S4,S8,S12,dan S16 dengan Nilai awal Seragam



Gambar 5.8.. Hasil Simulasi Konsentrasi Sedimen Tersuspensi Terhadap Waktu di Stasiun S5,S9,S13,dan S17 dengan Nilai awal Seragam.

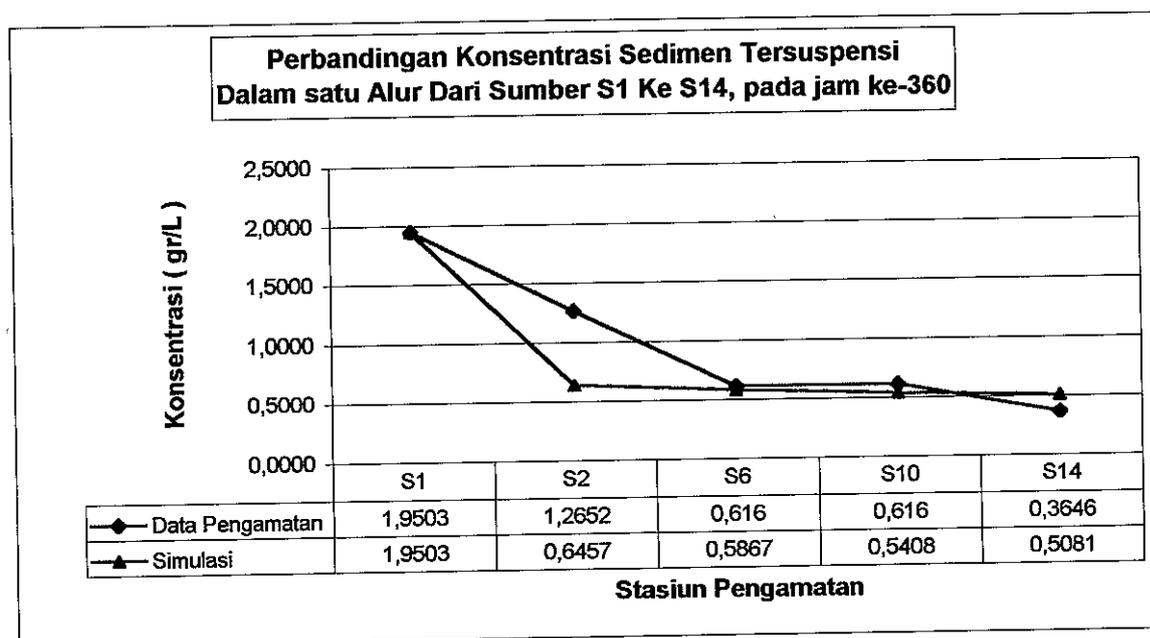
Salah satu sumber terbesar yang memberikan penambahan konsentrasi sedimen tersuspensi adalah adanya sumber yang berasal dari aktifitas daratan dan disekitar perairan tersebut (*Waste Source*). Sebagaimana fungsinya dan berdasarkan hasil pengamatan lapangan bahwa kandungan air sungai yang masuk ke perairan pantai Banjir Kanal Timur Semarang ini telah mengandung limbah domestik dan limbah industri yang terbawa oleh keberadaan sungai-sungai tersebut dari daerah sebelah hulu muara yang melalui pusat kota Semarang. Hal ini didukung oleh data lapangan seperti tersaji pada Tabel 5.1, dimana konsentrasi sedimen tersuspensi di badan Sungai Tambak Lorok (S18) sebesar 0,8702 gr/L, Sungai Banjir Kanal Timur (S19) sebesar 1,1396gr/L, dan Sungai Tenggang (S20) sebesar 0,8902 gr/L. Hal ini juga didukung oleh data pemantauan rata-rata tiap jam selama 24 jam di muara dari sistem ketiga sungai tersebut, dimana konsentrasi sedimen tersuspensi sebesar 1,9503 gr/L yang masuk ke perairan pantai. Dari data-data tersebut terlihat bahwa sumber terbesar

dari konsentrasi sedimen tersuspensi yang mempengaruhi kualitas Perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang adalah berasal dari aktifitas di daratan.

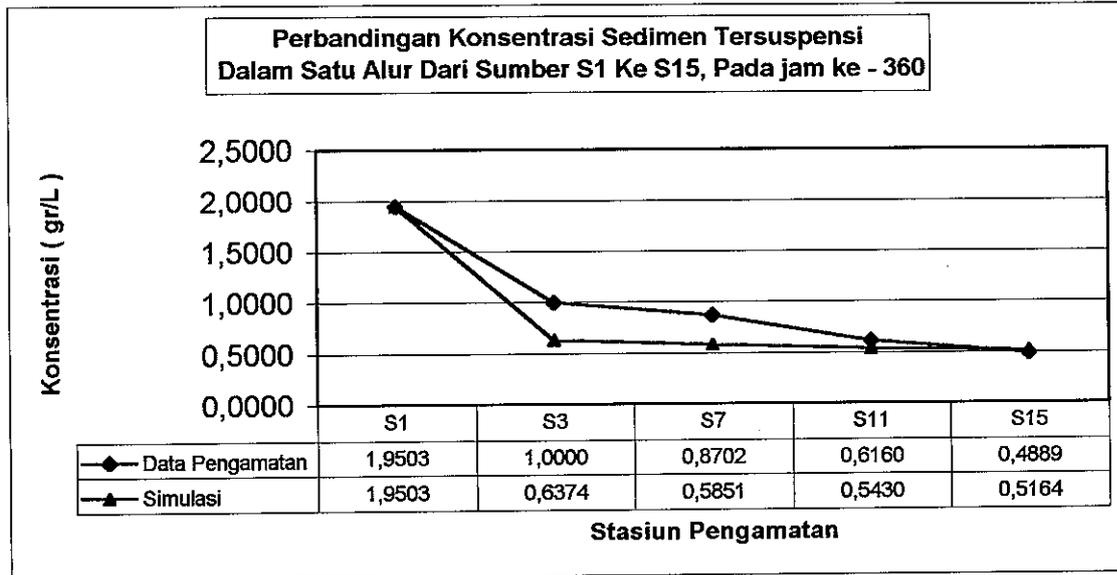
5.6. Verifikasi Konsentrasi sedimen tersuspensi.

Verifikasi konsentrasi sedimen tersuspensi, dilakukan dengan cara membandingkan hasil simulasi model dengan data lapangan, guna mendapatkan besarnya nilai kesalahan relatif (relative error).

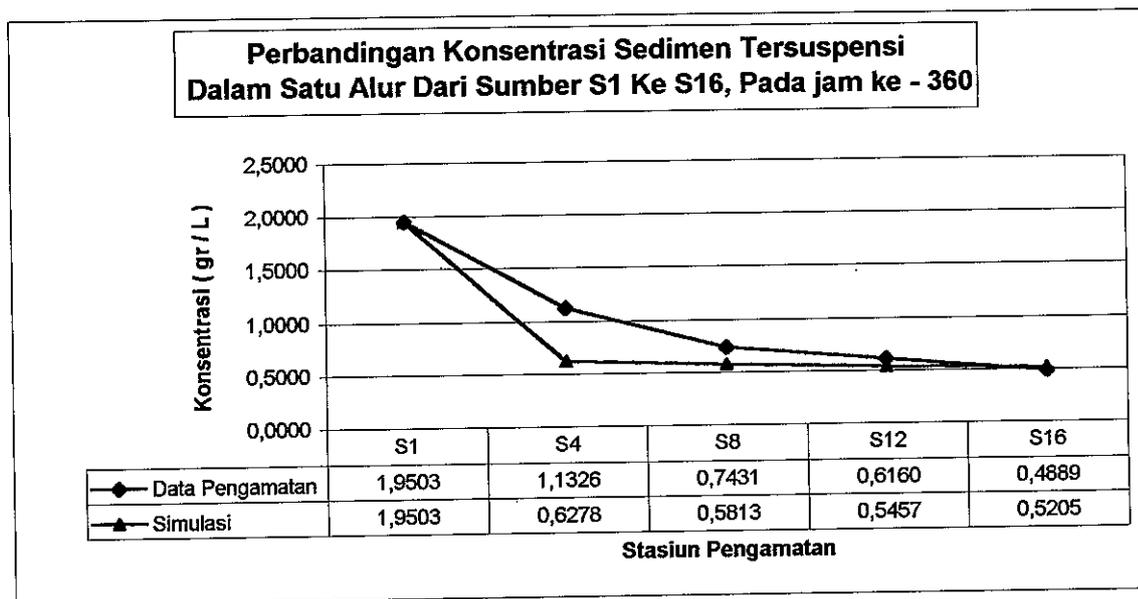
Gambar 5.9 – Gambar 5.12, memperlihatkan perbandingan konsentrasi sedimen tersuspensi hasil simulasi model (jam ke 360) dengan data pengamatan lapangan. Tampak pada gambar bahwa nilai konsentrasi sedimen tersuspensi hasil pengamatan lapangan dan hasil simulasi model pada titik terjauh dari sumber mempunyai nilai konsentrasi yang relatif hampir sama, hal tersebut bisa diartikan bahwa dispersi sedimen tersuspensi mempunyai nilai yang semakin kecil kearah lepas pantai.



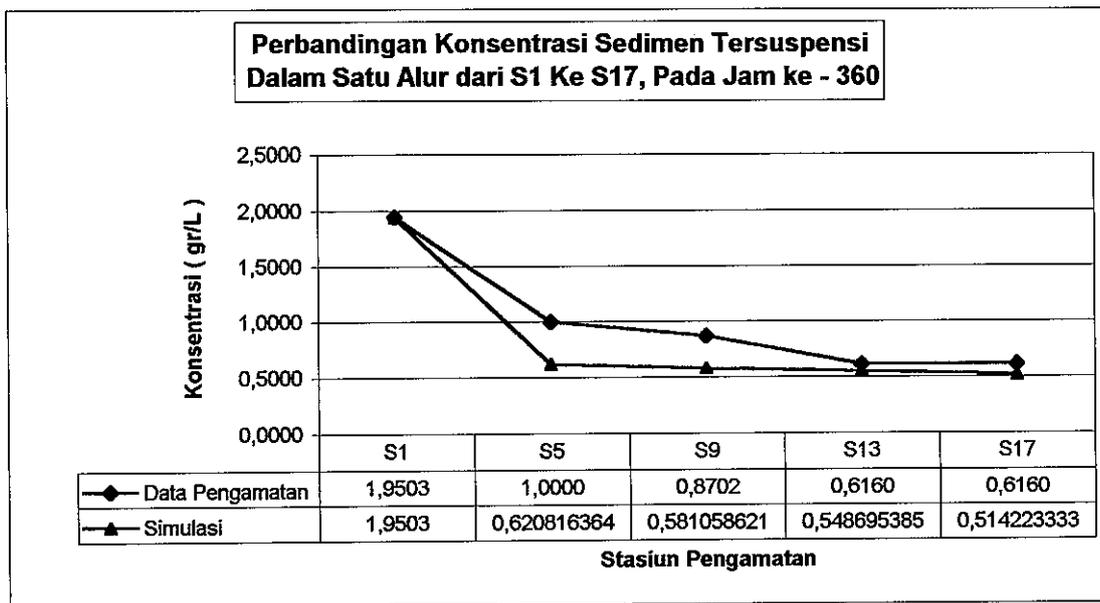
Gambar 5.9. Verifikasi Sedimen Tersuspensi Simulasi 15 Hari Arus Pasang Surut Dengan Nilai Seragam dalam satu alur S1 ke S14



Gambar 5.10. Verifikasi Sedimen Tersuspensi Simulasi 15 Hari Arus Pasang Surut Dengan Nilai Seragam dalam satu alur S1 ke S15.



Gambar 5.11. Verifikasi Sedimen Tersuspensi Simulasi 15 Hari Arus Pasang Surut Dengan Nilai Seragam dalam satu alur S1 ke S16



Gambar 5.12. Verifikasi Sedimen Tersuspensi Simulasi 15 Hari Arus Pasang Surut Dengan Nilai Seragam dalam satu alur S1 ke S17

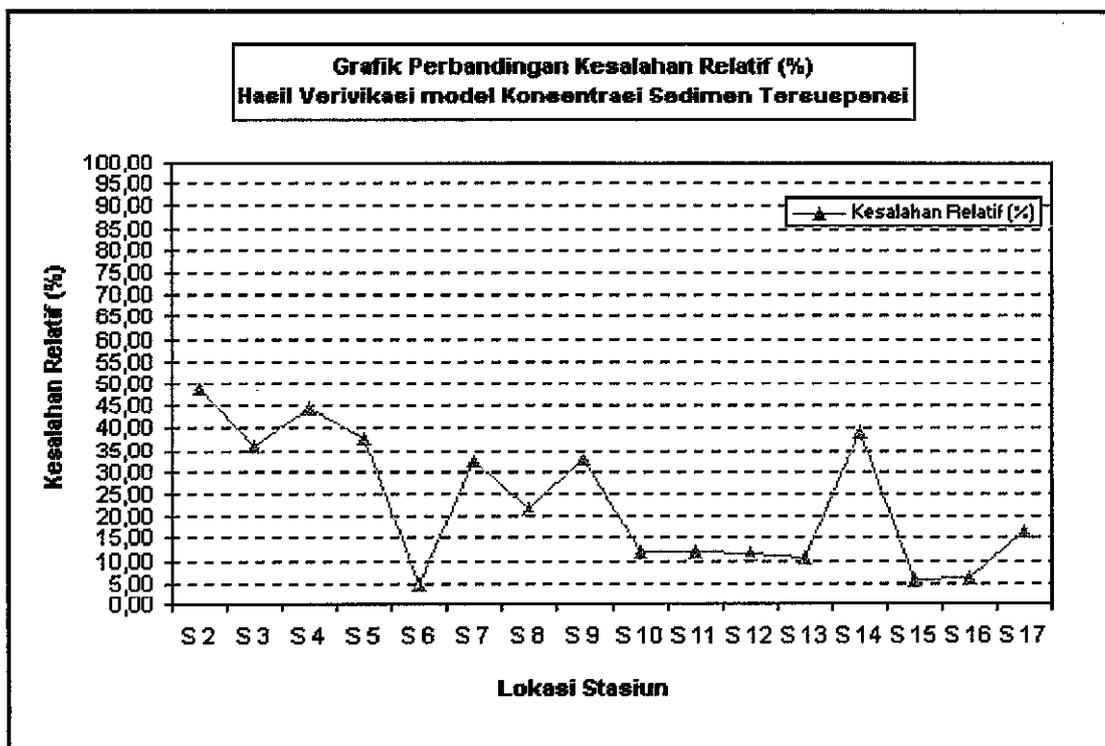
Besarnya perbandingan kesalahan relatif hasil model konsentrasi sedimen sebesar 23,412 %, Seperti tersaji pada Tabel 5.3. tersebut, kesalahan relatif simulasi umumnya berada dibawah 50 %.

Secara umum pola dispersi konsentrasi sedimen tersuspensi semakin rendah ke arah laut, hal ini ditunjukkan pula oleh fenomena simulasi model. Konsentrasi maksimum berada disekitar sumber yaitu muara dari sistem aliran sungai Banjir Kanal Timur Semarang, dimana dari hasil pengamatan dan simulasi model secara berturut-turut adalah 1,2652 gr/L dan 0,6457 gr/L, sedangkan konsentrasi minimum berada pada stasiun di lepas pantai dengan nilai 0,3646 gr/L dari hasil pengamatan dan 0,4987 gr/L dari hasil simulasi model.

Terjadinya perbedaan nilai konsentrasi sedimen tersuspensi antara pengamatan dan simulasi yang cukup signifikan tersebut diakibatkan karena pada waktu simulasi konsentrasi sedimen tersuspensi pada perairan tersebut dianggap nol (perairan dianggap jernih).

Tabel 5.3. Perbandingan Nilai Presentase Kesalahan Relatif (RE) Hasil Verifikasi Model

| Stasiun | Pengamatan (X) | Simulasi(C) | Kesalahan Relatif (%) |
|-----------------------|--------------------|-------------|-----------------------|
| | Nilai Awal Seragam | | |
| S 2 | 1,2652 | 0,6457 | 48,9614 |
| S 3 | 1,0000 | 0,6374 | 36,2645 |
| S 4 | 1,1326 | 0,6278 | 44,5721 |
| S 5 | 1,0000 | 0,6208 | 37,9184 |
| S 6 | 0,6160 | 0,5867 | 4,7565 |
| S 7 | 0,8702 | 0,5851 | 32,7608 |
| S 8 | 0,7431 | 0,5813 | 21,7675 |
| S 9 | 0,8702 | 0,5811 | 33,2270 |
| S 10 | 0,6160 | 0,5408 | 12,2045 |
| S 11 | 0,6160 | 0,5430 | 11,8546 |
| S 12 | 0,6160 | 0,5457 | 11,4131 |
| S 13 | 0,6160 | 0,5487 | 10,9261 |
| S 14 | 0,3646 | 0,5081 | 39,3480 |
| S 15 | 0,4889 | 0,5164 | 5,6235 |
| S 16 | 0,4889 | 0,5205 | 6,4724 |
| S 17 | 0,6160 | 0,5142 | 16,5222 |
| Rata – rata Kesalahan | | | = 23,42 % |



Gambar 5.14. Grafik Perbandingan Kesalahan Relatif (%) hasil Verifikasi Model.

BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian lapangan dan simulasi model yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan :

1. Model '*dispersi sedimen*' yang dibangun dapat mensimulasikan keadaan dispersi Sedimen tersuspensi di Perairan Pantai Banjir Kanal Timur Semarang. Verifikasi model dispersi sedimen tersuspensi dengan simulasi yang dilakukan, yaitu simulasi model arus pasang surut dengan nilai awal yang seragam menunjukkan rata-rata kesalahan relatif (*Mean Relative Error*) sebesar 23,412 % .
2. Pola penyebaran konsentrasi dari pengamatan lapangan dan hasil simulasi model menunjukkan semakin mengecil ke arah lepas pantai. Konsentrasi sedimen tersuspensi maksimum hasil pengamatan dan model pada jam ke 360 secara berturut-turut adalah :

Konsentrasi maksimum berada disekitar sumber yaitu muara dari sistem aliran sungai Banjir Kanal Timur Semarang, dimana dari hasil pengamatan adalah 1,2652 gr/l dan simulasi model 0,6457 gr/l, sedangkan konsentrasi minimum berada pada stasiun di lepas pantai dengan nilai dari hasil pengamatan 0,3646 gr/l dan dari hasil simulasi model 0,4987 gr/l

6.2. Saran.

Untuk memperbaiki dan mengembangkam model Penyebaran sedimen tersuspensi ini maka diperlukan upaya-upaya berikut ini :

- Data lapangan tidak hanya ditinjau dari hasil satu kali pengukuran, tetapi memperhatikan *trend* konsentrasi di daerah penelitian, yang diperoleh dari monitoring yang pernah dilakukan.

- Pemodelan memasukkan parameter fisik yang lebih lengkap, seperti parameter arus residu dari pasut dan arus yang disebabkan perbedaan densitas serta memasukkan parameter kinetika yang lebih kompleks.
- Peninjauan daerah penelitian yang lebih luas, tidak hanya terhadap Sungai Banjir Kanal Timur, Kali Tenggang, dan Tambak Lorok saja yang diperhatikan, tetapi juga sungai-sungai lain yang ada di sekitar lokasi
- Perlu dilakukan penambahan waktu simulasi model penyebaran sedimen tersuspensi dengan menggunakan nilai awal bervariasi sehingga diperoleh nilai konsentrasi yang lebih mendekati fenomena alam.

DAFTAR PUSTAKA

- Bambang Triatmojo. Dr.Ir. (1991/1992) , ***Muara Sungai*** , Journal Pengelolaan dan Perencanaan bangunan pantai ,Pusat Antar Universitas Ilmu Teknik Universitas Gajah Mada.
- Bambang Triatmojo,DR,Ir, ***Finite Difference Method***, Pusat Antar Universitas Ilmu Teknik Universitas Gajah Mada.
- Bjorn Kjerfve . (1988) ,***Hydrodynamics of Estuaries***,Marine Science Program Departement of Geology Belle W.Baruch Institute for marine Biology and Coastal Research.
- Blumberg A.F. (1977), ***Numerical Model of Estuarine Circulation***, journal of Hydraulics Division,HY3.
- Chapra, S.C., 1997. ***Surface Water Quality Modeling***, McGraw-Hill International Editions. Singapore.
- Curtis F.Gerald , (1989) , ***Applied Numerical Analysis***,
- Dilwyn Edward and Mike Hamson , (1989) , ***Guide To Mathematical Modelling***.
- Dadang K.Miharja,DR (1991), ***Pemodelan Bidang Kelautan dan Hidrologi***,Kursus Pemodelan Masalah Kelautan dan Hidrologi-Geofisika dan Dinamika Fluida-Teknik Lingkungan.
- G.D. Smith . (1985) , ***Numerical Solution of Partial Differential Equations ,Finite Difference Methods***.
- Hugo B.Fischer (1981). ***Transport Model for Inland and Coastal waters***,Proceeding of a Symposium on Predictive Ability.
- Jacques C.J. Nihoul and Bruno M.Jamart, (1987) , ***Three – Dimensional Model of Marine and Estuarine Dynamics***.
- Kowalik, Z., Murty, T.S., 1993. ***Numerical Modeling of Ocean Dynamics***. World Scientific. Singapore.

Koutitas, C.G., 1988. **Mathematical Model in Coastal Engineering**. Pentech Press. London

Mulyani, T., 1990. **Analisis Pola Sirkulasi Arus Laut yang Disebabkan oleh Angin di Perairan Utara Jawa Tengah**. Tugas Akhir Sarjana Strata Satu. Jurusan Geofisika dan Meteorologi FMIPA. Institut Teknologi Bandung.

O.C.Zienkiewicz and K.Morgan, (1982), **Finite Elements And Approximation**.

Paul Cadelina Rivera (1997), **Hydrodynamics, Sediment Transport and Light Extinction Off Cape Bolinao, Philippines**, Dissertation Hydrolic and Enviromental Engineering for the Degree of DOCTOR

Pierre Y. Julien . (1995), **Erosion And Sedimentation**.

Setiadi, H., 1998. **Analisis Sebaran Logam Berat di Perairan Pantai Semarang**. Tesis Magister. Program Pascasarjana Oseanografi dan Sains Atmosfer. Institut Teknologi Bandung.

Supputra, T., 1993. **Pengaruh Sedimentasi Kali Banjir Kanal Barat dan Timur terhadap Pendangkalan Perairan Pelabuhan Laut Tanjung Emas Semarang dan Sekitarnya**. Skripsi. Jurusan Geografi Fisik, Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.

Robert B. Ambrose, Jr., Tim A. Wool, John P. Connolly, Robert W. Schanz. 1988. **WASP4 (The Water Quality Analysis Simulation Program Version 4), A Hidrodynamic and Water Quality Model: Model Theory, User's Manual, and Programmer's Guide**.

Robert G, Robert A. Darrymple, **Water Wave Mechanics for Engineers and scientists**, Prentice-Hall, Inc., Englewood, New Jersey 07632