



TUGAS AKHIR - TF 141581

ANALISA KARAKTERISTIK ALIRAN ANGIN DI JEMBRAN SURAMADU SEBAGAI AKSES TRANSPORTASI

**ABYAN FARRAS BOFANDA
NRP. 0231134000125**

**Dosen Pembimbing :
Dr. Ridho Hantoro, S.T, M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018**



FINAL PROJECT - TF 141581

**ANALYSIS OF WIND FLOW
CHARACTERISTICS ON SURAMADU BRIDGE
AS TRANSPORTATION ACCESS**

**ABYAN FARRAS BOFANDA
NRP. 0231134000125**

**Supervisor :
Dr. Ridho Hantoro, S.T, M.T.**

**ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018**

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Abyan Farras Bofanda
NRP : 02311340000125
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “ANALISA KARAKTERISTIK ALIRAN ANGIN DI JEMBATAN SURAMADU SEBAGAI AKSES TRANSPORTASI” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, Juni 2018
Yang membuat pernyataan,

Abyan Farras Bofanda
NRP. 02311340000125

“Halaman ini memang dikosongkan”

TUGAS AKHIR

**ANALISA KARAKTERISTIK ALIRAN ANGIN DI
JEMBATAN SURAMADU SEBAGAI AKSES
TRANSPORTASI**

Oleh :

Abyan Farras Bofanda
NRP. 02311340000125

Surabaya, Juni 2018

**Menyetujui,
Dosen Pembimbing I**



Dr. Ridho Hantoro, ST, MT
NIP. 19761223200501 1 001

**Mengetahui,
Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS**



Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.

**DEPARTEMEN
TEKNIK FISIKA
NIP. 19780902 200312 1 002**

“Halaman ini memang dikosongkan”

**ANALISA KARAKTERISTIK ALIRAN ANGIN DI
JEMBATAN SURAMADU SEBAGAI AKSES
TRANSPORTASI**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Bidang Studi Rekayasa Energi dan Pengondisian Lingkungan
Progam Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Abyan Farras Bofanda
NRP. 02311340000125

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

1. Dr. Ridho Hantoro, ST, MT.(Pembimbing I)
2. Dr. Suyanto, ST, MT.(Penguji I)
3. Dr. Gunawan Nugroho, ST, MT.(Penguji II)
4. Dyah Sawitri, ST, MT.(Penguji III)

SURABAYA
JUNI 2018

ANALISA KARAKTERISTIK ALIRAN ANGIN DI JEMBATAN SURAMADU SEBAGAI AKSES TRANSPORTASI

Nama : Abyan Farras Bofanda
NRP : 0231134000125
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Ridho Hantoro, S.T, M.T.

Abstrak

Jembatan Suramadu merupakan jalur akses transportasi yang vital untuk masyarakat Jawa Timur, Khususnya Surabaya-Madura. Keamanan pada jalur Jembatan sangatlah penting, terutama terhadap gangguan dari angin laut. Angin laut dengan kecepatan yang tinggi dapat membahayakan bagi pengguna jalan. Tugas akhir ini melakukan Analisa terhadap karakteristik aliran angin pada jembatan Suramadu untuk mengetahui apakah angin laut dapat berbahaya bagi pengendara atau tidak. Jembatan dimodelkan dan diteliti menggunakan *Computational Fluid Dynamic* (CFD). Dari hasil pengambilan data angin selama setahun, didapat nilai kecepatan angin yang kemudian diambil 3 *sample* sebesar 2 m/s, 2.5 m/s, dan 3 m/s dengan arah angin masing- masing berasal dari utara, barat, dan barat laut. Hasil yang didapatkan dari penelitian adalah, dengan kecepatan yang sama, arah angin yang berasal dari barat mengalami kenaikan kecepatan sebesar 2 m/s saat melewati jembatan Suramadu. Sedangkan dari arah utara hanya mengalami kenaikan sebesar 1 m/s dan dari arah barat yang sejajar tidak mengalami kenaikan sama sekali. Kenaikan kecepatan tersebut disebabkan oleh fenomena *vortex* yang terjadi saat aliran angin melalui bentuk *bluff body* jembatan Suramadu.

Kata Kunci: Jembatah Suramadu, Kendaraan, Aliran Angin

ANALYSIS OF WIND FLOW CHARACTERISTICS ON SURAMADU BRIDGE AS TRANSPORTATION ACCESS

Name : *Abyan Faras Bofanda*
NRP : *02311340000125*
Department : *Teknik Fisika FTI-ITS*
Supervisor : *Dr. Ridho Hantoro, ST, MT.*

Abstract

Suramadu Bridge is the vital transportation access for the people of East Java, especially Surabaya-Madura. The security on this bridge is very important, especially towards the disruption of sea surface wind. Sea surface wind with high velocity could harm the drivers. This final project (undergraduate thesis) is analyzing the flow characteristics of the wind at Suramadu Bridge to know whether the sea surface wind is dangerous for the drivers or not. The bridge has been modelled and researched using Computational Fluid Dynamics (CFD) method. Based on the wind data generated for one year, it is obtained 3 samples used, about 2 m/s, 2.5 m/s, and 3 m/s with the wind direction each from north, west, and northwest. The result from this research is, with the same velocity, the wind direction from the west side has increased 2 m/s when passing Suramadu Bridge. Meanwhile from the north side it is only increased 1 m/s, and from the southwest side has not increased. The increase of the wind speed is because vortex phenomenon which happened when wind flow surpassing the bluff body of Suramadu bridge.

Keywords : *Suramadu Bridge, Transportation, Wind Flow*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW, hingga terselesaikannya tugas akhir beserta laporan tugas akhir yang berjudul **ANALISA KARAKTERISTIK ALIRAN ANGIN DI JEMBATAN SURAMADU SEBAGAI AKSES TRANSPORTASI**.

Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian tugas akhir dan laporan Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D selaku Ketua Departemen Teknik Fisika yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika.
2. Bapak Dr. Ridho Hantoro, S.T, M.T, selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
3. Ibu Dr. Ing. Doty Dewi Ristanti, S.T., M.T., selaku dosen wali yang telah membimbing penulis selama perkuliahan.
4. Kedua orang tua (Bapak Alm. Budhi Wibowo dan Ibu Fauzia Adhiyanti) serta Eyang (Asmah Soetrisno). Terimakasih atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan.
5. Seluruh teman Tugas Akhir dan para asisten Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan, terima kasih untuk semuanya.
6. Saudara Ahmad Reza atas dukungan dan nasihatnya yang membuat penulis bisa bangkit kembali.
7. Seluruh teman – teman Ngenak Total yang telah memberikan penulis semangat dan motivasi selama perkuliahan.
8. Sahabat Kantin Ijo yang telah menemani penulis selama perkuliahan.
9. Seluruh teman – teman Departemen Teknik Fisika angkatan 2013, terima kasih untuk semuanya.

10. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademik Teknik Fisika, terimakasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.
11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih atas bantuannya.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan tugas akhir ini tidak sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Fisika khususnya, dan civitas akademik ITS pada umumnya. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan tugas akhir bagi mahasiswa yang lain.

Surabaya, Juni 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
TITLE PAGE.....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME.....	v
LEMBAR PENGESAHAN I.....	vii
LEMBAR PENGESAHAN II.....	ix
ABSTRAK.....	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Laporan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Bluff Body</i>	5
2.2 Pola Aliran Fluida.....	6
2.3 Fenomena Aerodinamik.....	7
2.4 Karakteristik Aliran	8
2.5 Jembatan Suramadu	11
2.5.1 Konfigurasi Jembatan Suramadu	11
2.5.2 Batas Kecepatan Jembatan Suramadu.....	15
2.6 Computational Fluid Dynamics.....	15
2.6.1 Pre-Processing.....	16
2.6.2 Processing	16
2.6.3 Post-Processing	16
2.6.4 Validasi/Verifikasi Hasil Simulasi	16
2.6.5 Persamaan kontinuitas.....	17
2.6.6 Persamaan momentum	19
2.6.7 Persamaan energi	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	29

3.1	Alur Penelitian	29
3.1.1	Studi Literatur	30
3.1.2	Pelaksanaan Simulasi	30
3.1.3	Pengambilan Data	30
3.2	Obyek Penelitian	31
3.2.1	Data Kecepatan Angin	31
3.2.2	Geometri	33
BAB IV	ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN.....	35
4.1	Validasi Simulasi.....	35
4.1.1	Modelling.....	35
4.1.2	Meshing	35
4.1.3	Setting Komputasi.....	36
4.1.4	Plot Konvergensi.....	37
4.2	Simulasi Distribusi Kecepatan	38
4.2.1	Arah Angin Barat.....	38
4.2.2	Arah Angin Barat Laut	43
4.2.3	Arah Utara	48
4.3	Analisa Distribusi Kecepatan	51
4.4	Analisa Aliran Vortex	52
4.5	Pengaruh Angin terhadap Kendaraan.....	53
BAB V	PENUTUP	56
5.1	Kesimpulan	56
5.2	Saran.....	56
	DAFTAR PUSTAKA.....	58

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Ilustrasi <i>Streamline body</i> dan <i>bluff body</i>	5
Gambar 2. 2 Fenomena Aliran Vortex	6
Gambar 2. 3 Gaya angkat dan Gaya hambat	9
Gambar 2. 4 Nilai Koefisien Hambat	11
Gambar 2. 5 Causeway Suramadu Sisi Surabaya.....	12
Gambar 2. 6 Approach Bridge Suramadu	12
Gambar 2. 7 Main Bridge Suramadu.....	13
Gambar 2. 8 Layout Jembatan Suramadu.....	14
Gambar 2. 9 <i>Finite control volume fixed in space</i> (Anderson, 1995)	17
Gambar 2. 10 Pergerakan fluida (Anderson, 1995).....	19
Gambar 3. 1 Diagram Alir Tugas Akhir.....	29
Gambar 3. 2 Grafik Kecepatan Angin di Surabaya	32
Gambar 3. 3 Grafik Distribusi Arah Angin Tahunan di Surabaya	32
Gambar 3. 4 Geometri Jembatan Suramadu.....	33
Gambar 4. 1 Meshing Geometri Jembatan Suramadu.....	36
Gambar 4. 2 Plot Konvergensi	37
Gambar 4. 3 Pola <i>streamline</i> pada kecepatan 2 m/s arah W bagian (a) jalan lurus, (b) tanjakan, dan (c) tengah jembatan	39
Gambar 4. 4 Pola streamline pada kecepatan 2.5 m/s arah W bagian (a) jalan lurus, (b) tanjakan, dan (c) tengah jembatan	41
Gambar 4. 5 Plot kecepatan angin pada kecepatan 2.5 m/s arah W	40
Gambar 4. 6 Plot kecepatan angin pada kecepatan 3 m/s arah W.....	41
Gambar 4. 7 Pola Streamline pada kecepatan 3 m/s arah W bagian (a) jalan lurus, (b) tanjakan, dan (c) tengah jembatan	42
Gambar 4. 8 Plot kecepatan angin pada kecepatan 2 m/s arah NW	43
Gambar 4. 9 Pola Streamline pada kecepatan 2 m/s arah NW bagian (a) jalan lurus, (b) tanjakan, dan (c) tengah jembatan	44

Gambar 4. 10 Pola Streamline pada kecepatan 2.5 m/s arah NW bagian (a) jalan lurus, (b) tanjakan, dan (c) tengah jembatan.....46

Gambar 4. 11 Plot kecepatan angin pada kecepatan 2.5 m/s arah NW45

Gambar 4. 12 Plot kecepatan angin pada kecepatan 3 m/s arah NW46

Gambar 4. 13 Pola Streamline pada kecepatan 3 m/s arah NW bagian (a) jalan lurus, (b) tanjakan, dan (c) tengah jembatan.....47

Gambar 4. 14 Plot kecepatan angin pada kecepatan 2 m/s arah N48

Gambar 4. 15 Pola Streamline pada kecepatan 2 m/s arah N.....49

Gambar 4. 16 Plot kecepatan angin pada kecepatan 2.5 m/s arah N49

Gambar 4. 17 Pola Streamline pada kecepatan 2.5 m/s arah N...50

Gambar 4. 18 Plot kecepatan angin pada kecepatan 3 m/s arah N50

Gambar 4. 19 Pola Streamline pada kecepatan 3 m/s arah N.....51

Gambar 4. 20 Aliran (a) streamline dan (b) kontur vortex pada tepi jembatan51

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Data Angin Tahunan	31
Tabel 4. 1 Ukuran elemen berdasarkan <i>boundary conditions</i>	35

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jembatan dikenal sebagai alat penyebrangan bagi kebanyakan orang. Jenis jembatan berdasarkan fungsi, lokasi, bahan konstruksi dan tipe struktur sekarang ini telah mengalami perkembangan pesat sesuai dengan kemajuan jaman. Mulai dari jembatan kayu sederhana untuk menyeberangi sungai kecil hingga jembatan moderen nan megah bernilai triliunan rupiah, seperti Jembatan Suramadu. Jembatan Suramadu adalah jembatan terpanjang di Indonesia yang menghubungkan Pulau Jawa dan Pulau Madura. Jembatan ini mulai beroperasi pada tanggal 10 Juni 2010. Oleh karena meningkatnya ketergantungan masyarakat terhadap Jembatan Suramadu maka keamanan jembatan harus ditinjau agar pengguna tidak celaka. Salah satu aspek yang mempengaruhi keamanan pada jembatan adalah faktor lingkungan, seperti aliran angin.

Angin merupakan udara yang bergerak yang diakibatkan oleh rotasi bumi dan juga karena adanya perbedaan tekanan udara di sekitarnya (Aprianto, 2014). Angin bergerak dari tempat bertekanan udara tinggi ke tempat bertekanan udara rendah. Semakin tinggi suatu tempat, semakin kencang pula angin yang bertiup, hal ini disebabkan semakin tinggi suatu tempat, gaya gesekan ini semakin kecil kecepatan angin yang bergerak di atas daratan dan lautan sangat berbeda. Oleh karena itu jembatan yang dibangun di atas laut akan lebih berisiko terhadap angin terutama angin samping atau biasa disebut *crosswind* (Baker et al, 2009). *Crosswind* adalah angin yang arahnya tegak lurus dengan arah perjalanan suatu kendaraan. Hal tersebut dapat mempengaruhi efek aerodinamis pada suatu kendaraan. Angin kencang diatas jembatan dapat menyebabkan kecelakaan dan membahayakan pengguna jembatan. Bentuk struktur jembatan sendiri juga dapat berpengaruh pada aliran udara di sekitar jembatan (Xu dan Guo, 2014). Pada saat terjadi *crosswind* yang kencang, kecepatan angin bisa berubah drastis saat kendaraan melalui sebuah penghalang

angin, misal penyangga jembatan atau saat menyalip kendaraan lainnya. Hal ini sangat berbahaya karena kendaraan akan sulit dikontrol dan bisa terjadi kecelakaan (Charuvisit, 2004).

Pada jembatan Suramadu sendiri, batas aman kecepatan angin bagi pengendara sepeda motor adalah 40 km/jam. Jika angin mencapai kecepatan 40 km/jam atau lebih, maka jembatan Suramadu akan ditutup untuk jalur pengendara sepeda motor. Selama ini telah terjadi beberapa kali penutupan jembatan Suramadu bagi pengendara motor karena angin kencang, tetapi belum pernah terjadi untuk jalur mobil.

Oleh karena itu, pada penelitian kali ini akan dilakukan Analisa aliran angin pada Jembatan Suramadu untuk menentukan tingkat keamanan kendaraan yang berjalan di atas jembatan tersebut saat terpapar angin samping diatas jembatan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, rumusan masalah dari penulisan tugas akhir ini adalah :

- a. Bagaimana karakteristik angin sebelum dan sesudah melewati Jembatan Suramadu?
- b. Bagaimana pengaruh karakteristik angin yang berubah karena efek yang ditimbulkan dari jembatan Suramadu terhadap daerah disekitarnya?

1.3 Tujuan

Berdasarkan pemaparan latar belakang dan permasalahan maka tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a. Untuk mengetahui karakteristik angin sebelum dan sesudah melewati Jembatan Suramadu.
- b. Untuk mengetahui pengaruh karakteristik angin yang berubah karena efek yang ditimbulkan dari Jembatan Suramadu terhadap daerah disekitarnya.

1.4 Batasan Masalah

Bedasarkan identifikasi masalah maka batasan masalah dari tugas akhir ini adalah :

- a. Jembatan yang digunakan adalah jembatan Suramadu
- b. Jembatan dalam kondisi tidak ada kendaraan yang melaju
- c. Efek pada struktur jembatan diabaikan
- d. Variasi yang digunakan adalah arah dan kecepatan angin

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir adalah sebagai berikut:

- a. **BAB I PENDAHULUAN**
Pada bab I ini terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan sistematika laporan.
- b. **BAB II TEORI PENUNJANG**
Pada bab II ini dibahas mengenai teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan, seperti teori CFD dan *Bluff Body*.
- c. **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**
Pada bab III ini berisi mengenai rancangan dari penelitian yang dilakukan, metode dan langkah-langkah dalam penelitian.
- d. **BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN**
Pada bab IV ini berisi tentang data hasil penelitian dari simulasi Jembatan Suramadu dan analisis karakteristik angin yang menegenai jembatan tersebut.
- e. **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**
Pada bab V ini diberikan kesimpulan tentang tugas akhir yang telah dilakukan berdasarkan data-data yang diperoleh, serta diberikan saran sebagai penunjang maupun pengembangan tugas akhir selanjutnya.

“Halaman ini memang dikosongkan”

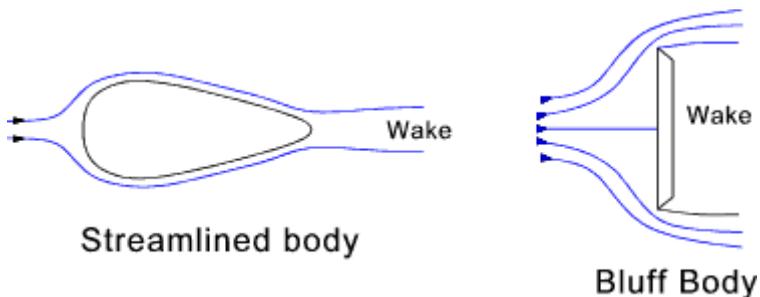
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Bluff Body*

Suatu aliran dibagi menjadi 2 jenis yaitu aliran dalam (*internal flow*) dan aliran luar (*external flow*). Aliran dalam adalah aliran yang terjadi dalam pengertian fluida yang mengalir dibatasi oleh suatu dinding atau *boundary* tertentu, misalnya aliran di dalam pipa atau aliran dalam turbin. Sedangkan pada aliran luar yaitu aliran yang tidak dibatasi dinding terjadi misalnya pada aliran udara yang melewati *body* pesawat, *body* mobil atau aliran air yang melewati *body* kapal. Aliran luar ini dibagi menjadi 2 jenis yaitu aliran *Bluff Body* dan aliran *Streamlined Body*. Dimana terjadi perbedaan antara nilai C_d (koefisien drag) dan C_f (Koefisien gesekan) (Munson, 2009).

Bluff Body adalah sebuah bangun geometri yang memiliki hambatan udara yang tinggi sehingga jika memberikan aliran fluida dengan kecepatan yang tinggi akan menyebabkan terbentuknya *vortex*. Aliran digolongkan menjadi aliran *Bluff Body* saat nilai C_d lebih besar daripada nilai C_f .

Vortex adalah suatu aliran yang terjadi dengan kondisi fluida tersebut partikelnya berotasi pada aliran rotasinya terhadap titik pusatnya. Pelepasan *vortex*nya tersebut, biasa kita kenal dengan istilah *vortex shedding*. Biasanya *vortex shedding* terjadi karena aliran fluida yang melalui *bluff body* memiliki kecepatan yang tinggi.

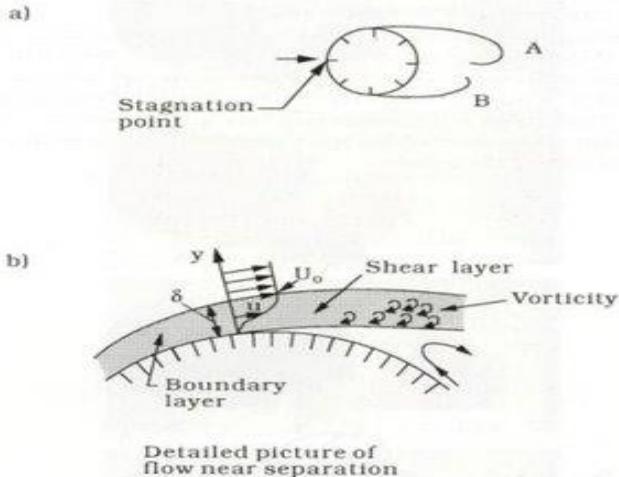


Gambar 2. 1 Ilustrasi *Streamline body* dan *bluff body*

2.2 Pola Aliran Fluida

Bila suatu medan aliran fluida (air atau udara, misalnya) terhalang oleh sebuah benda maka pola aliran fluida tersebut akan terganggu dari kondisi stasionernya lalu akan mencari kondisi kesetimbangan barunya (Liaw, 2005). Misalkan pada kasus sebuah silinder yang berada dalam aliran steady, maka akan terjadilah suatu pola aliran tertentu di sekeliling permukaan silinder tersebut. Ternyata, pola aliran ini salah satunya tergantung pada suatu parameter yang disebut Angka Reynolds (Reynolds number).

Berdasarkan banyak percobaan visualisasi aliran yang telah dilakukan, nilai Re inilah yang akan menentukan bagaimana bentuk pola aliran yang akan terjadi. Beberapa di antaranya misalnya, bila nilai $Re < 5$, maka yang terjadi adalah pola aliran yang mulus, tanpa terjadi pusaran-pusaran local fluida (*vortex*) dan tidak terjadi pula pemisahan aliran pada saat aliran sudah melewati silinder (*creeping flow*). Selanjutnya bila kecepatan aliran dinaikkan, yang berarti nilai Re makin bertambah besar, misalnya untuk rentang $5 < Re < 40$, maka akan mulai terbentuk *vortex*. Dalam rentang nilai Re ini akan terbentuk sepasang *vortex* simetris di belakang silinder yang berputar stasioner tanpa terpecah selama rentang nilai Re tidak berubah.



Gambar 2. 2 Fenomena Aliran Vortex

Namun ketika nilai Re ini terus dinaikkan, maka medan aliran makin menjadi tidak stabil, yang mana lambat-laun formasi *vortex* yang terbentuk mulai berantakan dengan pola-pola yang tertentu. Maka pada saat itulah akan timbul suatu fenomena yang dinamakan Pelepasan *Vortex* (*Vortex Shedding*), yang mulai terjadi pada saat nilai $Re > 40$. Fenomena ini adalah terlepasnya *vortex* secara bolak-balik di sisi-sisi silinder dengan pola dan frekuensi tertentu. Pola pelepasan *vortex* ini pun secara lebih detil akan memiliki bentuk tertentu sesuai dengan rentang angka Re -nya. Fenomena pelepasan *vortex* ini memang biasa terjadi pada hampir semua jenis aliran fluida yang memiliki nilai angka $Re > 40$. Pada nilai Re ini, lapisan batas (*boundary layer*) di sekeliling permukaan silinder akan memisah akibat adanya gradien tekanan balik dari geometri yang divergen dari aliran di sekitar sisi belakang silinder. Akibatnya terbentuklah suatu lapisan geser (*shear layer*). Hal ini secara skematis diilustrasikan dalam gambar diatas.

2.3 Fenomena Aerodinamik

Angin dapat memberi gaya dinamik yang signifikan pada jembatan. Jembatan berbentuk Panjang, seperti Jembatan Suramadu cenderung tidak kaku dan lebih mudah terpengaruh terhadap gaya aliran angin dibandingkan jembatan pendek yang cenderung lebih kaku (Carreiro, 2011). Dari segi struktur, banyak jembatan yang rusak akibat gangguan dari alam, salah satunya adalah gangguan angin. Dari segi keamanan pengguna yang melalui jembatan, fenomena aerodinamik juga dapat menyebabkan kecelakaan yang fatal. Berikut merupakan beberapa efek dinamik aliran angin yang dapat berpengaruh bagi pengguna jembatan.

2.3.1 Flutter

Flutter adalah suatu fenomena interaksi antara struktur dan kecepatan angin yang menyebabkan struktur bergerak. Fenomena ini terjadi karena aliran udara yang mengalir di sekitar struktur “bergetar” (getaran ini sering kita amati seperti suara orang bersiul pada suatu struktur), dan frekuensi getaran dari aliran tersebut sama atau mendekati dari frekuensi natural struktur sehingga terjadi resonansi.

Resonansi yang terjadi tersebut dapat mengakibatkan struktur bergetar hebat bahkan hingga patah atau runtuh.

Flutter diakibatkan karena aliran urara berkecepatan tinggi membawa energi yang lebih besar dari batas kemampuan struktur jembatan untuk meredam getaran yang di timbulkan aliran tersebut. Contoh jembatan yang gagal dalam menghadapi fenomena ini adalah jembatan Tahoma. Pada penelitian kali ini tidak dibahas lebih lanjut mengenai *flutter* karena tidak membahas efek aliran angin pada struktur.

2.3.2 Buffeting

Jika gerakan *flutter* lebih kearah hentakan pada suatu struktur, maka *buffeting* lebih mengarah kepada suatu hentakan yang terjadi pada struktur, atau dalam kasus ini adalah jembatan, yang diakibatkan oleh aliran angin yang turbulen.

2.4 Karakteristik Aliran

Seperti yang sudah dibahas diatas, jembatan merupakan suatu contoh struktur berbentuk *bluff body*. Struktur *bluff body* menyebabkan aliran yang melewati struktur tersebut akan mengalami turbulensi

2.4.1 Reynold's Number

Dalam mekanika fluida, bilangan Reynolds adalah rasio antara gaya inersia (ρv^2) terhadap gaya viskos (μ/L) yang mengkuantifikasikan hubungan kedua gaya tersebut dengan suatu kondisi aliran tertentu. Bilangan ini digunakan untuk mengidentikasikan jenis aliran yang berbeda, misalnya laminar, turbulen atau transisi. Namanya diambil dari Osborne Reynolds (1842–1912) yang mengusulkannya pada tahun 1883.

Bilangan Reynold merupakan salah satu bilangan tak berdimensi yang paling penting dalam mekanika fluida dan digunakan, seperti halnya dengan bilangan tak berdimensi lain, untuk memberikan kriteria untuk menentukan *dynamic similitude*. Jika dua pola aliran yang mirip secara geometris, mungkin pada fluida yang berbeda dan laju alir yang berbeda pula, memiliki nilai bilangan tak berdimensi yang relevan, keduanya disebut memiliki kemiripan dinamis.

Rumus bilangan Reynolds umumnya dapat dilihat di Persamaan (2.1)..

$$Re = \frac{\rho.V.D}{\nu} = \frac{\text{gaya inersia}}{\text{viskositas}} \quad (2.1)$$

Jika $\nu = \mu/\rho$, maka $\frac{1}{\nu} = \frac{\rho}{\mu}$; sehingga:

$$Re = \frac{V.D}{\nu} \quad (2.2)$$

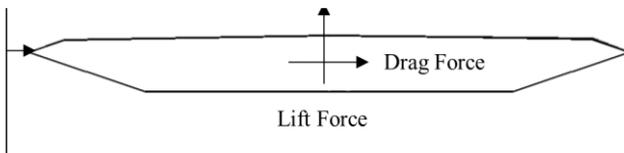
Dimana Re merupakan bilangan Reynold, dengan V adalah kecepatan fluida dengan satuan m/s dan D merupakan Panjang suatu dimensi. Lalu ν merupakan lambing viskositas kinematic fluida (m^2/s), μ lambing dari viskositas absolut fluida dinamis ($kg/m.s$) dan ρ merupakan massa jenis fluida (kg/m^3).

2.4.2 Lift Coefficient

Lift Coefficient atau gaya angkat adalah gaya yang mengangkat suatu benda keatas yang terjadi karena tekanan dibawah benda lebih besar daripada tekanan diatas benda. Persamaan untuk menghitung gaya angkat ditunjukkan pada persamaan (2.3).

$$C_L = \frac{2.F_L}{\rho.V^2.A} \quad (2.3)$$

Dimana F_L merupakan gaya angkat yang tegak lurus dari aliran fluida ($kg.m/s^2$) dan ρ adalah massa jenis fluida (kg/m^3). Kemudian V lambing dari kecepatan fluida (m/s) serta A yang merupakan satuan ukuran luas penampang (m^2)



Gambar 2. 3 Gaya angkat dan Gaya hambat

2.4.3 Drag Coefficient

Drag Coefficient dalam mekanika fluida adalah suatu bilangan tak berdimensi yang menyatakan suatu hambatan atau resistant dari suatu benda (*object*) yang berada di dalam suatu aliran. Semakin rendah nilai *drag coefficient*, maka hambatan aerodinamik maupun hidrodinamiknya semakin kecil. Dengan kata lain semakin kecil nilai *drag coefficient*, maka suatu benda semakin memiliki bentuk aerodinamik sehingga hambatan udara maupun hambatan airnya menjadi kecil dan fluida dapat dengan lancar melewati benda tersebut. Untuk menghitung *drag coefficient*, maka dapat digunakan persamaan (2.4).

$$C_D = \frac{2 \cdot F_D}{\rho \cdot V^2 \cdot A} \quad (2.4)$$

Dimana F_D merupakan gaya angkat yang tegak lurus dari aliran fluida ($\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$) dan ρ adalah massa jenis fluida (kg/m^3). Kemudian V lambing dari kecepatan fluida (m/s) serta A yang merupakan satuan ukuran luas penampang (m^2)

Gaya hambat dipengaruhi oleh besar C_D (*drag coefficient*). Koefisien hambat (C_D) merupakan koefisien hambatan aerodinamik yang dipengaruhi oleh faktor bentuk dan kehalusan permukaan suatu penampang. Koefisien hambat (C_D) dari sebuah penampang dapat dianggap sebagai beban aero terhadap gerakan maju. Semakin besar nilai C_D maka semakin besar pula hambatan aerodinamiknya. Bentuk penampang yang mempunyai nilai C_D yang kecil dikatakan sebagai bentuk aerodinamis dimana bentuknya adalah *streamline* yang mengikuti arah aliran udara yang melewati permukaan penampangnya.

Untuk mengukur nilai koefisien hambat secara praktis, terdapat beberapa nilai koefisien hambat sesuai dengan bentuk benda yang telah ditentukan, yaitu seperti yang tergambar pada Gambar 2.4.

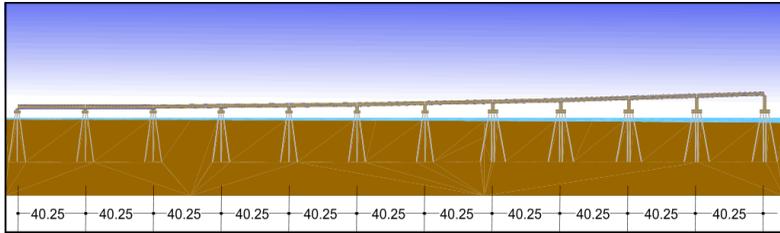
Shape	Drag Coefficient
Sphere	0.47
Half-sphere	0.42
Cone	0.50
Cube	1.05
Angled Cube	0.80
Long Cylinder	0.82
Short Cylinder	1.15
Streamlined Body	0.04
Streamlined Half-body	0.09

Gambar 2. 4 Nilai Koefisien Hambat (Fox, 2003)

2.5 Jembatan Suramadu

2.5.1 Konfigurasi Jembatan Suramadu

Jembatan Suramadu merupakan jembatan cable stayed yang melintasi Selat Madura, menghubungkan Pulau Jawa (Kota Surabaya) dan Pulau Madura (Kabupaten Bangkalan). Jembatan ini telah diresmikan penggunaannya pada tanggal 10 Juni 2009. Total panjang keseluruhan Jembatan Suramadu adalah 5.438 m dengan lebar kurang lebih 30 m, mempunyai 4 (empat) lajur dua arah untuk kendaraan roda 4 selebar 3,5 m dan 2 (dua) lajur darurat, serta 2 (dua) lajur khusus kendaraan roda 2 di sisi tepi jembatan. Jembatan Suramadu terdiri atas 5 (lima) bagian, yaitu

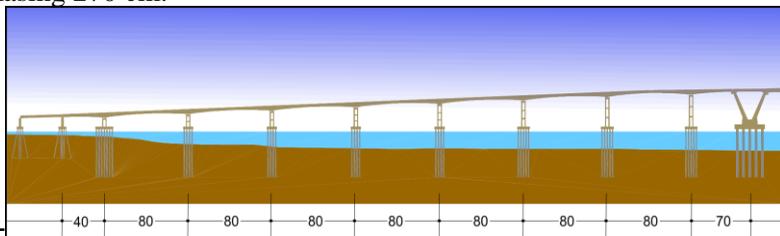


Gambar 2. 5 Causeway Suramadu Sisi Surabaya

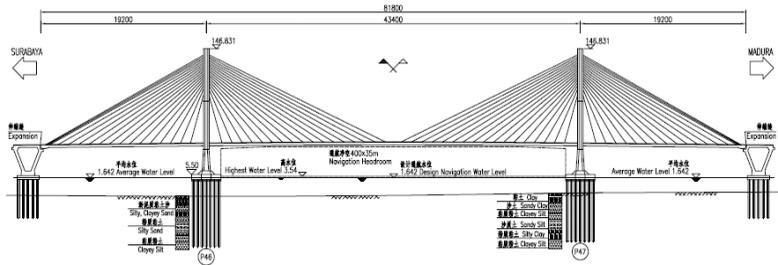
a. *Causeway* Sisi Surabaya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 berfungsi menghubungkan konstruksi jembatan dari darat di sisi Surabaya melalui perairan dangkal di pantai Surabaya dengan panjang bentang 1457.5 m dengan konstruksi *Prestress Concrete I* (PCI) Girder bentang 40 m yang terdiri dari 36 bentang yang disangga pondasi pipa baja berdiameter 60 cm.

b. *Approach Bridge* Sisi Surabaya, yaitu pada Gambar 2.6 menghubungkan Causeway Sisi Surabaya dengan Jembatan Utama (*Main Bridge*) dengan total panjang bentang 672 m dengan konstruksi *Concrete Box Girder* bentang 80 m sebanyak 9 bentang yang disangga pondasi *bored pile* dengan diameter 180 cm, khusus untuk pilar-V dengan diameter 220 m.

c. *Main Bridge* yang ditunjukkan pada Gambar 2.6 terdiri dari tiga segmen yaitu dua bentang dengan panjang masing-masing 192 m dan satu bentang utama dengan panjang 434 m sehingga total panjang keseluruhan jembatan 818 m. Pondasi untuk tiang utama jembatan (*pylon*) terdiri dari 56 buah *bored pile* dengan diameter masing-masing 270 cm.



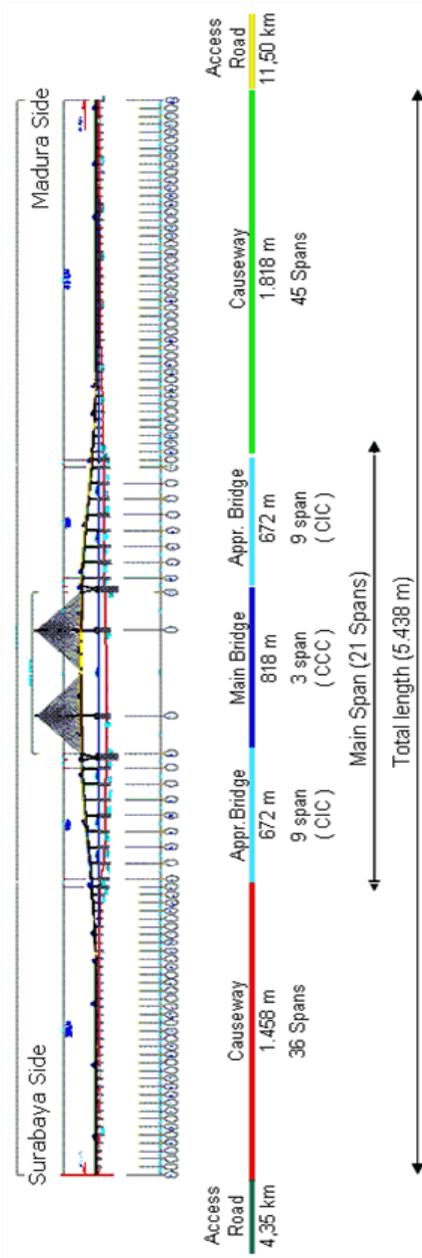
Gambar 2. 6 Approach Bridge Suramadu



Gambar 2. 7 Main Bridge Suramadu

Main Bridge mempunyai panjang bentang masing – masing dengan rincian 192 m + 434 m + 192 m. Ruang bebas (*clearance*) horisontal pada bentang tengah sebesar 400 m, sedang ruang bebas (*clearance*) vertikal pada bentang tengah adalah 35 m dari keadaan air pasang tertinggi (*High Water Level/HWL*). Secara total Jembatan Suramadu diperlihatkan seperti gambar 2.6 berikut dimana kedua sisi jembatan dihubungkan dengan jalan akses sisi Surabaya sepanjang 4.35 km dan jalan akses sisi Madura sepanjang 11.50 km.

Kerusakan yang terjadi pada jembatan dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti faktor beban lalu lintas, lingkungan maupun bencana alam. Faktor Beban lalu-lintas yang bekerja terus menerus bahkan dengan intensitas yang semakin besar dapat merusak beberapa komponen jembatan. Disamping itu Bencana alam seperti gempa bumi, tanah longsor maupun banjir dapat merusak jembatan apabila desain jembatan kurang mengantisipasi kemungkinannya terjadinya bencana tersebut. Jembatan Suramadu dimulai masa awal konstruksi pada bulan Agustus tahun 2003 dan open traffic jembatan dilakukan pada bulan Juni tahun 2009, sehingga pada tahun 2017 Jembatan Suramadu sudah dioperasikan sekitar 8 tahun. Disisi lain desain umur Jembatan Suramadu direncanakan mencapai 100 tahun sehingga diperlukan pemeriksaan yang lebih detail tentang kondisi kesehatan jembatan, untuk memastikan kehandalan struktur jembatan terhadap beban lalu lintas, agar kenyamanan pengguna jalan dapat terlayani dengan baik hingga umur rencana.



Gambar 2. 8 Layout Jembatan Suramadu

2.5.2 Batas Kecepatan Jembatan Suramadu

Menurut PT. Jasa Marga selaku pengelola Jalan Tol Jembatan Suramadu, jalan tol jembatan Suramadu akan ditutup untuk umum jika kecepatan udara yang terjadi diatas jembatan melewati batas aman yang ditetapkan. Batas aman yang ditetapkan adalah 40 km/h atau 11 m/s dan 60 km/h atau 17 m/s. jika kecepatan angin mencapai 11 m/s maka lajur akan ditutup untuk kendaraan beroda dua. Sedangkan jika kecepatan angin mencapai 17 m/s maka jembatan akan ditutup untuk umum, baik bagi kendaraan beroda dua maupun kendaraan beroda empat atau lebih.

Argentini et al. (2011) mengatakan *crosswind* sangat berbahaya bagi pengendara dengan kecepatan 90 km/h jika angin yang berhembus diatas 10 m/s. kendaraan yang rentan terkena efek *crosswind* adalah kendaraan yang memiliki *body* tinggi dan lebar, seperti truk pick up dan kontainer. Hal itu disebabkan karena semakin besar *body* yang menghalangi aliran angin, maka efek *drag* yang terjadi akan semakin besar, sehingga berpeluang membuat kendaraan terbanting atau terdorong.

2.6 Computational Fluid Dynamics

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan ilmu yang digunakan untuk memprediksi aliran fluida, transfer massa dan panas, dan fenomena lain yang menggunakan persamaan matematika berdasarkan *finite element*. Pada CFD digunakan persamaan kekekalan massa, kekekalan energi, dan kekekalan momentum untuk menghasilkan data prediksi yang dibutuhkan seperti tekanan, kecepatan, temperatur, dan vektor. Geometri yang disimulasikan akan dibagi menjadi bagian – bagian kecil yang disebut dengan kontrol volume. Di setiap kontrol volume ini akan dilakukan perhitungan matematis. Semakin banyak kontrol volume yang dibuat maka akan semakin banyak juga perhitungan yang dilakukan dan menyebabkan kerja komputer yang semakin berat.

Dalam melakukan simulasi menggunakan CFD, terdapat tiga tahapan yang harus dilaksanakan yaitu:

2.6.1 Pre-Processing

Pada tahap ini dilakukan pembentukan geometri yang akan di simulasikan dan pendefinisian *boundary condition*. Pembuatan geometri dapat menggunakan *software* GAMBIT, Solidwork, dan lain sebagainya yang merupakan *software* sejenis. Proses setelah geometri yaitu *meshing*, *meshing* adalah proses pembagian geometri menjadi kontrol volume kecil yang menjadi tempat perhitungan matematis. Semakin banyak kontrol volume yang dibuat maka akan semakin halus pula hasil yang didapatkan.

2.6.2 Processing

Pada tahap ini akan dihitung data – data yang sudah di masukan sebelumnya secara iterasi. Iterasi dilakukan hingga perhitungan konvergen dan memiliki *error* yang kecil.

2.6.3 Post-Processing

Tahap terakhir ini adalah tahap dimana data hasil perhitungan dapat dilihat dalam beberapa bentuk seperti grafik, gambar, dan animasi dengan pola warna tertentu.

2.6.4 Validasi/Verifikasi Hasil Simulasi

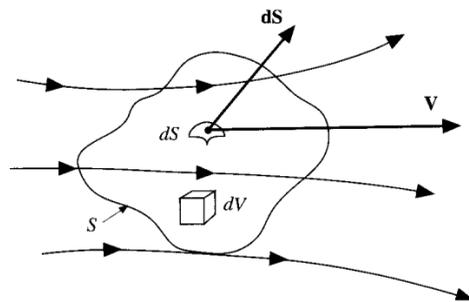
Validasi adalah representasi akurat dari dunia nyata dari sudut pandang penggunaan model (AIAA G-077-1998). Proses verifikasi perlu dilakukan untuk pengujian model ducting kereta melalui komputer. Verifikasi dilakukan untuk menunjukkan tingkat kebenaran dari simulasi yang dilakukan. Untuk menentukan tingkat kevalidan, dapat dilakukan dengan beberapa metode yaitu memastikan semua *boundary condition* dan inisialisasi telah sesuai dengan teori dan kasus aktual serta dengan cara membandingkan dengan sebuah acuan/standart yang telah ada dengan referensi yang jelas.

Keakurasian hasil analisis CFD ditentukan oleh 3 (tiga) faktor yaitu (NASA , 2008) :

- a. Konvergensi, yaitu analisis dimana tingkat kesalahan yang dirancang dapat dipenuhi oleh model yang dikembangkan. Nilai konvergensi / *variable value* dibawah 10⁻⁴.
- b. Studi *grid independence*, yaitu pengetahuan tentang efisiensi pemakaian grid.
- c. Verifikasi, yaitu membandingkan hasil CFD dengan data lain yang ada sehingga secara realistis kebenaran dapat diterima.
- d. *Examine Consistency*, yaitu pemeriksaan konsistensi pada fluida CFD. Misalnya, aliran dalam saluran harus menjaga konservasi massa melalui saluran. *Total pressure recovery* lebih lanjut pada inlet harus tetap konstan atau menurun melalui saluran.
- e. Periksa Ketidakpastian Model, model fisik dalam kode CFD mengandung ketidakpastian karena kurang lengkap pemahaman atau pengetahuan tentang proses fisik. Salah satu model dengan paling banyak ketidakpastian adalah model turbulensi. Ketidakpastian dapat diperiksa dengan melakukan berbagai simulasi dengan berbagai model turbulensi yang berbeda dan memeriksa pengaruhnya pada hasil simulasi

2.6.5 Persamaan Kontinuitas

Persamaan kontinuitas terdapat pada hukum konservasi massa, yang menyatakan bahwa massa suatu sistem adalah kekal dan tidak berubah. Hal ini menunjukkan bahwa dalam aliran *steady*, aliran massa yang memasuki dan meninggalkan *control volume* adalah sama.



Gambar 2. 9 *Finite control volume fixed in space* (Anderson, 1995)

Berdasarkan Gambar 2.9 didapat kan persamaan massa aliran dari fluida yang melewati area dS adalah

$$\rho V_n dS = \rho V \cdot dS \quad (2.5)$$

Jika persamaan (2.5) dibawa ke bentuk integral akan menjadi:

$$B = \iint_S \rho V \cdot dS \quad (2.6)$$

Massa dalam elemen volume dV adalah ρdV maka total massa dalam *control volume* dapat ditulis menjadi persamaan (2.7).

$$\iiint_V \rho dV \quad (2.7)$$

Kemudian, perubahan massa di dalam volum V dapat dituliskan menjadi persamaan (2.8),

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV \quad (2.8)$$

serta perubahan massa terhadap waktu $= \frac{\partial \rho}{\partial t} (dxdydz)$ (2.9)

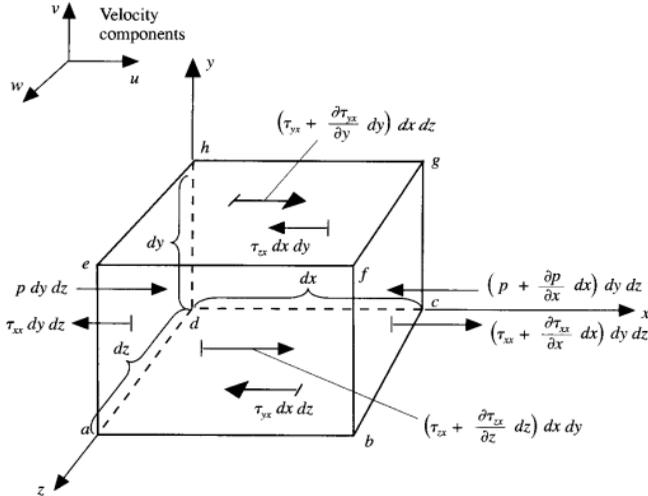
Hasil akhirnya, didapatkan prinsip fisika dari konservasi massa yang di rumuskan dalam persamaan (2.10)

$$\left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] dxdydz = -\frac{\partial \rho}{\partial t} (dxdydz) \frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] = 0 \quad (2.10)$$

Atau dapat disederhanakan menjadi

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (2.11)$$

2.6.6 Persamaan Momentum



Gambar 2. 10 Pergerakan fluida (Anderson, 1995)

Hukum ini juga dikenal sebagai hukum kedua Newton. Hukum tersebut mengatakan bahwa gaya resultan yang bereaksi pada objek sama dengan percepatan dikalikan dengan massa objek tersebut. Sebuah elemen fluida dalam bidang tiga dimensi seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.10. Pada bidang tiga dimensi, gaya berada pada sumbu-x, sumbu -y, dan sumbu-z. Pada gambar tersebut, hanya gaya pada sumbu-x yang ditampilkan. Gaya bereaksi pada elemen yakni gaya pada permukaan dan gaya pada *body* elemen.

Mengacu pada Gambar 2.10, hukum Newton 2 pada sumbu x dapat dirumuskan pada persamaan (2.12).

$$F_x = ma_x \quad (2.12)$$

F_x dan a_x adalah gaya-gaya resultan dan percepatan pada arah- x . Dengan mensubstitusi semua gaya-gaya yang berada di gambar dan dengan menggunakan definisi dari percepatan $a_x = Du/Dt$, maka elemen fluida yang bergerak dapat dirumuskan dengan persamaan (2.13)

$$\begin{aligned}
 \text{Net surface force arah } x &= \left[p - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) \right] dydz \\
 &+ \left[\left(\tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} dx \right) - \tau_{xx} \right] dydz \\
 &+ \left[\left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy \right) - \tau_{yx} \right] dx dz \\
 &+ \left[\left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz \right) - \tau_{zx} \right] dx dy
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

Total gaya yang bekerja pada sumbu x menjadi :

$$F_x = \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right] dx dy dz + \rho f_x dx dy dz \tag{2.14}$$

Massa dari elemen fluida akan sama dengan :

$$m = \rho dx dy dz \tag{2.15}$$

Percepatan didapatkan dari perubahan kecepatan terhadap waktu

$$a_x = \frac{Du}{Dt} \tag{2.16}$$

Menggabungkan persamaan 2.12, 2.14 dan 2.16, maka akan didapatkan

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \tag{2.17a}$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \tag{2.17b}$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (2.17c)$$

Persamaan Navier-Stokes dapat dituliskan dalam bentuk turunan, sehingga didapatkan persamaan (2.18).

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho V \cdot \nabla u \quad (2.18)$$

Persamaan (2.18) juga dapat disusun menjadi persamaan seperti pada persamaan (2.19).

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} &= \rho \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial t} \\ \rho \frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \frac{\partial \rho}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Persamaan (2.19) jika ditambahkan vektor menjadi:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\rho u V) &= u \nabla \cdot (\rho V) - (\rho V) \cdot \nabla u \\ \rho V \cdot \nabla u &= \nabla \cdot (\rho u V) - u \nabla \cdot (\rho V) \end{aligned} \quad (2.20)$$

Persamaan (2.18), (2.19), (2.20) kemudian disubstitusikan, yang kemudian didapatkan persamaan (2.21)

$$\begin{aligned} \rho \frac{Du}{Dt} &= \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \frac{\partial \rho}{\partial t} - u \nabla \cdot (\rho V) + \nabla \cdot (\rho u V) \\ \rho \frac{Du}{Dt} &= \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} - u \nabla \cdot (\rho V) \right] + \nabla \cdot (\rho u V) \end{aligned} \quad (2.21)$$

Dimana persamaan (2.21) dapat disederhanakan menjadi persamaan (2.22).

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) \quad (2.22)$$

Persamaan (2.17) dan (2.22) kemudian disubstitusikan, yang hasilnya menjadi persamaan (2.21) yang juga dikenal sebagai persamaan Navier-Stokes dalam bentuk konservasi.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (2.21a)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v V) = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (2.21b)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w V) = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (2.21c)$$

Jika kurva tingkat fluida stress versus strain diplot, ada dua fenomena yang dapat ditarik(diketahui). Ada fluida dengan kurva linear dan satunya lagi dengan kuva non linear Untuk fluida ini, tegangan normal dapat dirumuskan sebagai persamaan (2.22a), (2.22b), dan (2.22c). Sedangkan untuk tegangan geser dapat dirumuskan sebagai persamaan ((2.22e), (2.22d), dan (2.22f).

$$\tau_{xx} = \lambda(\nabla \cdot V) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.22a)$$

$$\tau_{yy} = \lambda(\nabla \cdot V) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.22b)$$

$$\tau_{zz} = \lambda(\nabla \cdot V) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.22c)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right] \quad (2.22d)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left[\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right] \quad (2.22e)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left[\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right] \quad (2.22f)$$

Jika μ adalah viskositas molekular dan λ adalah koefisien viskositas kedua, Stokes menjabarkan rumus untuk mendapatkan λ seperti yang tercantum pada persamaan (2.23).

$$\lambda = -\frac{2}{3}\mu \quad (2.23)$$

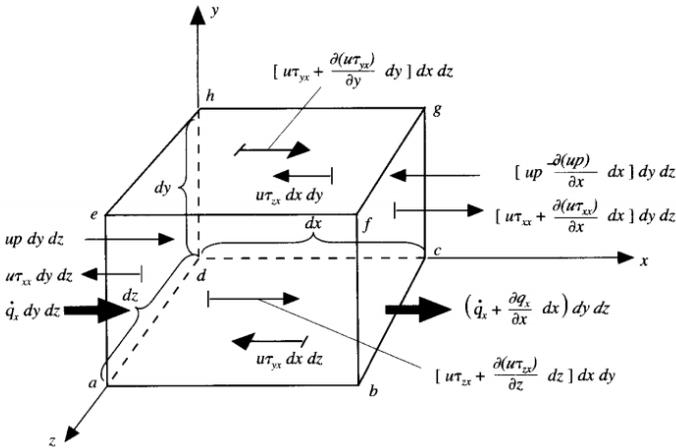
Dari hal tersebut didapatkan jika persamaan (2.22) dan (2.23) disubstitusikan, akan didapatkan persamaan konversi momentum. Persamaan momentum tercantum pada persamaan (2.24).

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \\ & -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \nabla \cdot \mathbf{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \rho f_x \end{aligned} \quad (2.24a)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = \\ & -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \nabla \cdot \mathbf{V} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \rho f_y \end{aligned} \quad (2.24b)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = \\ & -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \nabla \cdot \mathbf{V} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \rho f_z \end{aligned} \quad (2.24c)$$

2.6.7 Persamaan Energi



Gambar 2. 11 Energi flux pada elemen fluida yang bergerak (Anderson,1995)

Pada persamaan energi, prinsip fisik ketiga yaitu energi yang di konservasi diterapkan. Menyatakan perubahan tingkat energi di dalam (A) sebuah elemen adalah sama dengan jumlah dari fluks panas bersih (B) kedalam elemen dan tingkat kerja yang dilakukan (C) pada elemen oleh *body* dan kekuatan permukaan. Hukum ini di tuliskan pada persamaan (2.25)

$$A = B + C \tag{2.25}$$

Mengacu pada Gambar 2.11, gaya yang bekerja karena *body* dapat dirumuskan menjadi persamaan (2.26),

$$V = \rho f \cdot V(dx dy dz) \tag{2.26}$$

Gaya yang bekerja oleh tekanan pada sumbu x dapat dituliskan dituliskan pada persamaan (2.27).

$$\left[up - \left(up + \frac{\partial(up)}{\partial x} dx \right) \right] dy dz = - \frac{\partial(up)}{\partial x} dx dy dz \tag{2.27}$$

Dari persamaan (2.27), didapatkan gaya yang bekerja oleh tegangan dan regangan permukaan pada sumbu x. gaya tersebut dituliskan pada persamaan (2.28).

$$\left[\left(u\tau_{yx} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} \right) - u\tau_{yx} \right] dx dz = \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} dx dy dz \quad (2.28)$$

Dari persamaan (2.28) didapatkan persamaan gaya yang bekerja pada elemen yang bergerak dalam fluida, yang kemudian dituliskan pada persamaan (2.29)

$$\left[-\frac{\partial(up)}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} \right] dx dy dz \quad (2.29)$$

Dari persamaan (2.29), Nilai C dapat dirumuskan seperti pada persamaan (2.30).

$$C = - \left[\begin{array}{l} \left(\frac{\partial(up)}{\partial x} + \frac{\partial(vp)}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial(wp)}{\partial z} \\ + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} \\ + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} \\ + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \\ + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} \\ + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \end{array} \right] dx dy dz + \rho f \cdot V dx dy dz \quad (2.30)$$

Diketahui persamaan (2.31) adalah persamaan penambahan perubahan panas per satuan massa,

$$\text{Volumetric heating of element} = \rho \dot{q} dx dy dz \quad (2.31)$$

serta diketahui persamaan perpindahan panas pada sumbu x karena konduksi panas seperti yang tertulis sebagai persamaan (2.32).

$$\left[\dot{q}_x - \left(\dot{q}_x + \frac{\partial \dot{q}_x}{\partial x} \right) \right] dy dz = - \frac{\partial \dot{q}}{\partial x} dx dy dz \quad (2.32)$$

Dari persamaan (2.32), didapatkan persamaan penambahan panas fluida seperti pada persamaan (2.33).

$$\text{Heating of fluid element by conduction} = - \left(\begin{array}{c} \frac{\partial \dot{q}_x}{\partial x} \\ + \frac{\partial \dot{q}_y}{\partial y} \\ + \frac{\partial \dot{q}_z}{\partial z} \end{array} \right) dx dy dz \quad (2.33)$$

Nilai B adalah penjumlahan dari persamaan (2.31) dan (2.33), sehingga dapat ditulis persamaan (2.34).

$$B = \left[\rho \dot{q} - \left(\frac{\partial \dot{q}_x}{\partial x} + \frac{\partial \dot{q}_y}{\partial y} + \frac{\partial \dot{q}_z}{\partial z} \right) \right] dx dy dz \quad (2.34)$$

Berdasarkan hukum Fourier tentang konduksi panas persamaan 2.34 dapat ditulis ulang menjadi :

$$B = \left[\rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] dx dy dz \quad (2.35)$$

Dengan mempertimbangkan A sebagai energi total, didapatkan persamaan (2.36)

$$A = \rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{V^2}{2} \right) dx dy dz \quad (2.36)$$

Bentuk akhir dari persamaan energi adalah dapat ditulis pada persamaan (2.37).

$$\begin{aligned}
 \rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{V^2}{2} \right) &= \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\
 &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial(up)}{\partial x} + \frac{\partial(vp)}{\partial y} + \frac{\partial(wp)}{\partial z} + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} \\
 &+ \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} \\
 &+ \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} + \rho f \cdot V
 \end{aligned} \tag{2.37}$$

Dengan memepertimbangkan energi internal, persamaan (2.37) dapat ditulis kembali sebagai berikut :

$$\rho \frac{D(u^2/2)}{Dt} = -u \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho u f_x \tag{2.38}$$

$$\rho \frac{D(v^2/2)}{Dt} = -v \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho v f_y \tag{2.39}$$

$$\rho \frac{D(w^2/2)}{Dt} = -w \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho w f_z \tag{2.40}$$

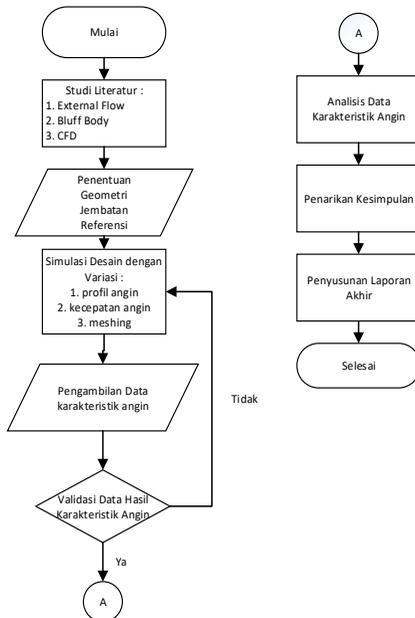
Dari hasil penjumlahan persamaan (2.38), (2.39) dan (2.40) dengan $u^2+v^2+w^2 = V^2$, kemudian dikurangi dengan persamaan (2.37), maka akan didapatkan persamaan baru yaitu :

$$\begin{aligned}
 \rho \frac{De}{Dt} &= \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\
 &- p \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \tau_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{yx} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{zx} \frac{\partial u}{\partial z} + \tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} \\
 &+ \tau_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial z} + \tau_{xz} \frac{\partial w}{\partial x} + \tau_{yz} \frac{\partial w}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial w}{\partial z}
 \end{aligned} \tag{2.41}$$

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian

Alur penelitian diperlukan sebagai panduan urutan pengerjaan penelitian, dimana dalam kasus ini penelitian tersebut adalah tugas akhir. Langkah-langkah dalam pengerjaan tugas akhir ini ditunjukkan pada diagram alir dpada Gambar 3.1. Secara garis besar, penelitian dimulai dari studi literatur referensi yang diperlukan untuk mengerjakan penelitian. Kemudian dilakukan pengambilan data. Pada penelitian kali ini, terdapat dua proses pengambilan data, yaitu data geometri jembatan Suramadu dan data kecepatan angin. Kemudian dilakukan proses menggambar geometri jembatan yang dilanjutkan dengan simulasi pada *software*. Langkah terakhir adalah melakukan Analisa dari hasil simulasi, yang kemudian dilanjutkan dengan penarikan kesimpulan serta penyusunan buku laporan tugas akhir.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Tugas Akhir

3.1.1 Studi Literatur

Studi literatur ini diperlukan untuk menunjang kegiatan tugas akhir yang baik. Studi literatur yang dilakukan berasal dari beberapa sumber buku dan jurnal. Adapun konsep yang dipelajari pada studi literatur ini yaitu tentang aliran angin dan CFD. Studi literatur ini bukan hanya dilakukan pada awal program namun juga terus dilakukan seiring dengan pelaksanaan tugas akhir.

3.1.2 Pelaksanaan Simulasi

Simulasi dimulai dengan membuat geometri dari objek yang digunakan. Objek yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah Jembatan Suramadu. Geometri yang dibuat sebanyak variasi yang dilakukan pada jumlah dan konfigurasi ketinggian. Setelah desain jembatan dan semua variasi jumlah beserta konfigurasinya telah dibuat, kemudian dilakukan proses meshing.

3.1.3 Pengambilan Data

Setelah dilakukan proses simulasi, maka dapat diambil data yang dihasilkan dari proses tersebut. Data aliran angin dapat diambil dan dilakukan eksperimen.

Data yang sudah didapat dari proses simulasi kemudian dianalisis berdasarkan teori – teori yang ada pada tahap studi literatur. Analisa data yang dilakukan yaitu membahas bagaimana pengaruh aliran udara di jembatan terhadap kendaraan yang melewati jembatan tersebut

3.1.4 Penarikan Kesimpulan

Data yang sudah dianalisis kemudian akan diambil beberapa kesimpulan berdasarkan data untuk menjawab permasalahan yang ditentukan di awal.

3.1.5 Penyesuaian Laporan Tugas Akhir

Penyesuaian laporan dilakukan sebagai tahap terakhir dari penelitian. Laporan disusun atas hasil penelitian yang dilakukan selama tugas akhir.

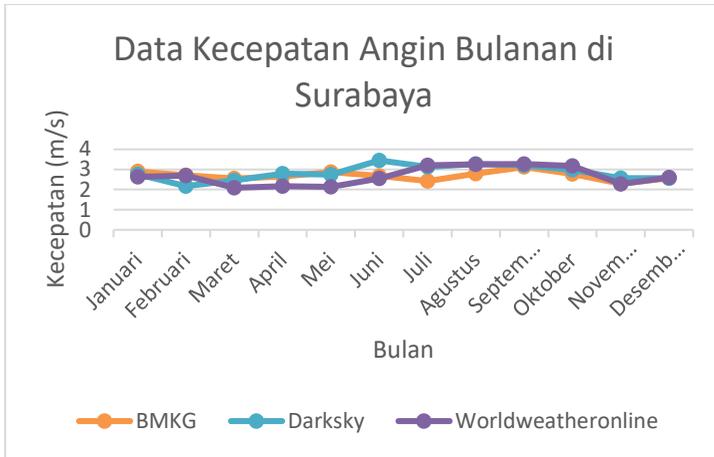
3.2 Obyek Penelitian

3.2.1 Data Kecepatan Angin

Data angin adalah data dari kecepatan angin yang berhembus pada saat tertentu. Data angin ini diperlukan sebagai input dari kecepatan angin yang akan dimasukkan kedalam simulasi. Pada penelitian kali ini akan digunakan tiga kecepatan angin dan tiga arah angin sebagai input simulasi angin yang berhembus pada jembatan Suramadu. Berikut adalah data angin yang diambil dalam waktu periode satu tahun.

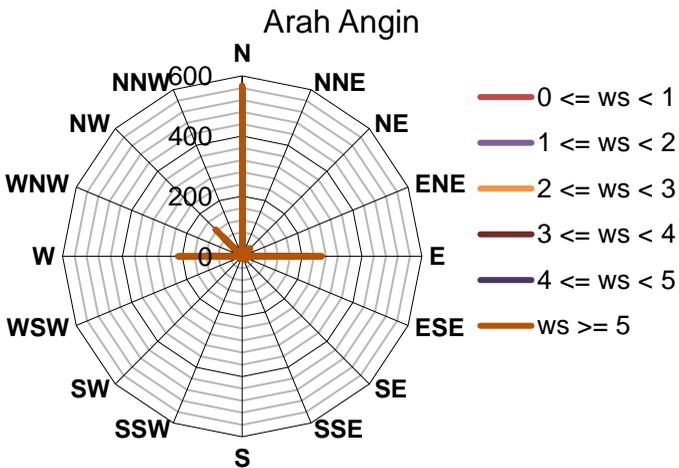
Tabel 3. 1 Data Kecepatan Angin di Surabaya

Bulan	Sumber		
	BMKG	Worldweather	Darsky
Januari	2.91	2.63	2.76
Februari	2.71	2.69	2.69
Maret	2.55	2.09	2.09
April	2.65	2.16	2.16
Mei	2.87	2.41	2.41
Juni	2.68	2.55	2.55
Juli	2.42	3.21	3.21
Agustus	2.79	3.26	3.26
September	3.12	3.27	3.27
Oktober	2.78	3.18	33.18
November	2.29	2.28	2.28
Desember	2.56	2.60	2.60



Gambar 3. 2 Grafik Kecepatan Angin di Surabaya

Dari data Tabel 3.1 diketahui rerata kecepatan angin pada tiap bulan selama setahun dari ketiga sumber. Data kecepatan anngin tersebut tersedia dalam satuan m/s. data tabel diatas jika diplotkan dalam grafik maka akan berupa sebagai berikut.



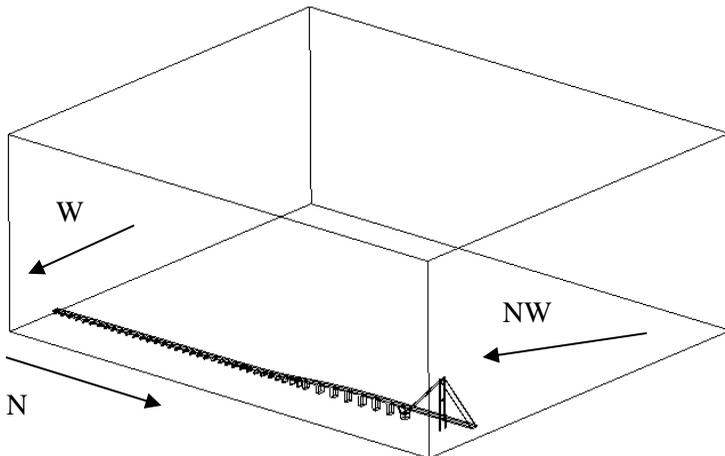
Gambar 3. 3 Grafik Distribusi Arah Angin Tahunan di Surabaya

Data angin dikumpulkan dari tiga sumber, yaitu BMKG, Darksky, dan World Weath Online selama setahun penuh. Kecepatan yang diambil dalam satuan m/s. selain itu diambil pula arah sumber aliran angin berdasarkan mata angin. Dari data tersebut dirata-rata dan ditemukan tiga kecepatan mayoritas, yaitu 2 m/s, 2.5 m/s, dan 3 m/s dengan arah dari utara (N), barat, (W), dan barat laut (NW)

3.2.2 Geometri

Model geometri dibuat pada software Autodesk Inventor dengan membuat model simetri karena model adalah identik antara kanan dan kiri, penggunaan model simetri ini juga sangat menghemat penggunaan *mesh*. Model di ekspor ke format IGES agar kompatibel. Permukaan-permukaan didefinisikan sebagai dua definisi. Pertama, permukaan depan, atas dan samping kiri adalah inlet. Kedua, permukaan belakang adalah outlet dan permukaan samping kanan adalah simetri.

Jembatan membentang kearah utara (N) dari arah Kota Surabaya menuju Pulau Madura, dengan posisi variasi arah angin seperti yang tercantum pada Gambar 3.4.



Gambar 3. 4 Geometri Jembatan Suramadu

BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Validasi Simulasi

4.1.1 Modelling

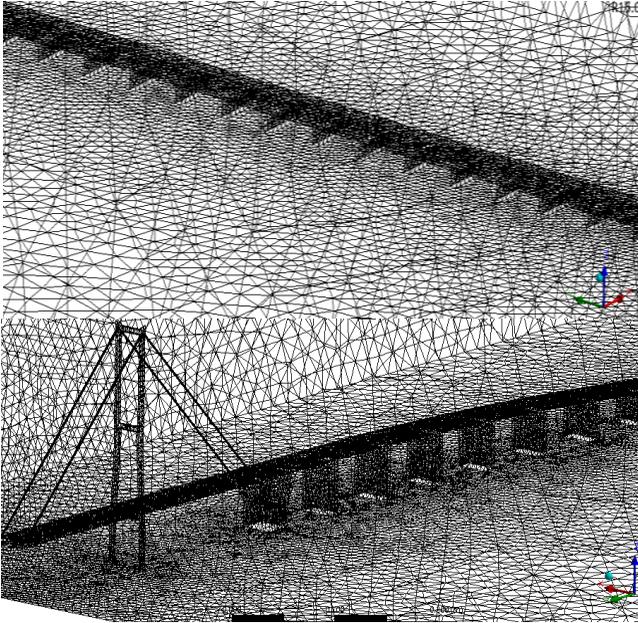
Mengacu pada penelitian Savas Erdem (2014), untuk mendapatkan hasil analisa yang mendekati aslinya, *structure* yang berada di sekitar bangunan yang berinteraksi dengan aliran angin harus dimasukkan kedalam simulasi. Ukuran domain yang digunakan pada simulasi sebesar 2 km x 2 km, dengan tinggi sebesar 900 m. Jembatan Suramadu diletakkan dalam domain persegi Panjang, dengan aliran angin yang diperlukan disediakan sebagai bi-directional melalui *surface* yang terkait dengan domain persegi ini. Elemen grid yang digunakan sebanyak 4 juta, *hybrid* antara hexagonal dan tetragonal. Untuk domain aliran, *wall boundary conditions* untuk jembatan dimodelkan dengan ukuran elemen yang berbeda.

Tabel 4. 1 Ukuran elemen berdasarkan *boundary conditions*

Boundary Surface	Maximum Element Size (m)
Tiang Penyangga (<i>Pylon</i>)	0.01
Jalan Jembatan (<i>Deck</i>)	0.01
Area Air	0.1

4.1.2 Meshing

Meshing merupakan proses membagi geometri yang telah dibuat menjadi bagian-bagian kecil yang disebut sebagai *control volume*. Ukuran *mesh* sangat menentukan tingkat validitas suatu hasil simulasi. Semakin kecil *mesh* yang digunakan, maka semakin baik pula akurasi. Tetapi komputasi yang akan dilakukan akan semakin berat.



Gambar 4. 1 Meshing Geometri Jembatan Suramadu

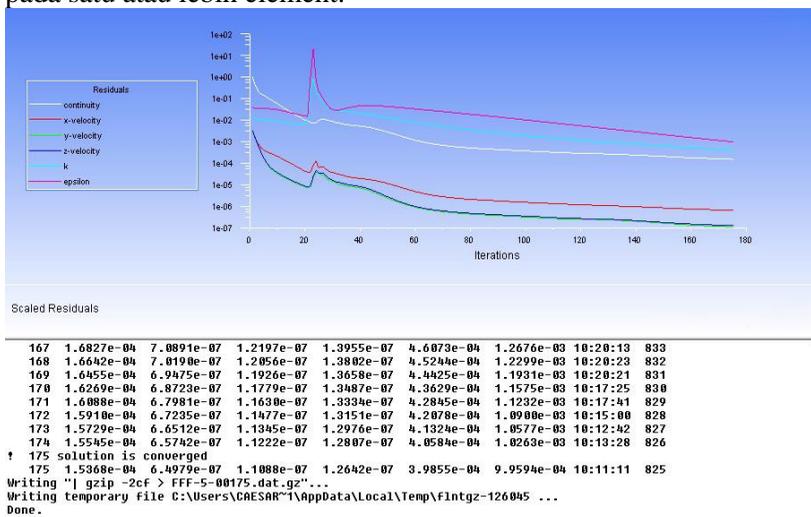
Selain ukuran, jenis *mesh* juga sangat mempengaruhi hasil komputasi. Pada dasarnya *mesh* yang semakin padat akan menghasilkan pola aliran yang semakin halus, namun *mesh* yang terlalu padat dapat memperlambat proses komputasi. Pada gambar 3.4 diatas telah ditunjukkan *meshing* pada geometri yang telah dibuat, dengan statistik *mesh* pada *nodes* sebesar 684.439 dan *elements* 3.982.278

4.1.3 Setting Komputasi

Pada Penelitian kali ini, setingan komputasi yang digunakan adalah tipe *pressure-based* dengan kondisi aliran fluida konstan terhadap waktu (*steady*). Model turbulensi yang digunakan adalah k-epsilon, dikarenakan banyak digunakan dan konservatif terhadap berbagai kasus aliran, serta mudah menuju konvergen. Selain itu, untuk inisialisasi yang digunakan adalah bertipe hybrid, dan jumlah iterasi hingga konvergen.

4.1.4 Plot Konvergensi

Root Mean Square Error (RSME) adalah batas deviasi error perhitungan yang ditentukan. Nilai dikatakan baik apabila RMSE yang ditentukan mendekati nol. Dalam studi ini RMSE yang digunakan sebesar 10^{-5} . Nilai ini merupakan nilai konvergensi terbaik dan telah banyak digunakan pada berbagai perhitungan aplikasi teknik terkait dengan perilaku fluida (Ansys, 2007; Dinham dkk., 2008). Pada studi ini, tingkat konvergensi yang dicapai berbeda - beda, namun konvergensi dapat tercapai antara iterasi ke 175 - 210 untuk setiap variasi yang diujikan. seperti yang ditunjukkan pada grafik Gambar 4.2, yang menunjukkan proses iterasi dan konvergensi untuk variasi kecepatan 2 m/s, berdasarkan gambar tersebut dapat terlihat bahwa konvergensi bisa dicapai pada iterasi ke 175 untuk RMSE yang di set pada 10^{-5} . Perbedaan jumlah iterasi yang dibutuhkan untuk konvergensi pada setiap variasi kecepatan utamanya disebabkan oleh peningkatan atau penurunan pada interaksi aliran didaerah tertentu, sehingga konsentrasi iterasi didaerah tersebut memiliki pengulangan pada satu atau lebih element.



Gambar 4. 2 Plot Konvergensi

Hasil yang konvergen mengindikasikan nilai-nilai (kecepatan, tekanan, kontinuitas dll) sudah mencapai nilai tertentu yang stabil atau dikenal dengan istilah konvergen sehingga dapat diambil data-datanya untuk keperluan analisis

4.2 Simulasi Distribusi Kecepatan

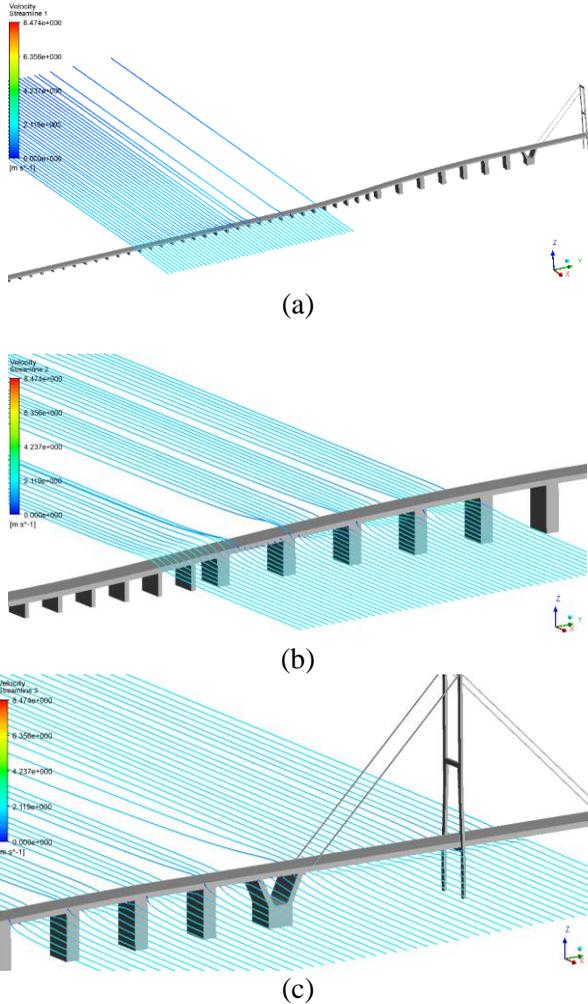
Pada tahap ini, dilakukan simulasi pada jembatan Suramadu. Berdasarkan hasil pengambilan data angin, maka data angin yang digunakan dalam penelitian ini adalah angin pada kecepatan 2 m/s, 2.5 m/s, serta 3 m/s. Kemudian untuk arah aliran angin yang diambil adalah arah utara atau *north* (N), arah barat atau *west* (W), serta arah barat laut atau *northwest* (NW). pada tiap kecepatan, diambil tiga titik pada jembatan, yaitu pada jalan lurus, jalan tanjakan arah tengah jembatan, dan bagian tengah jembatan. Pengambilan data di tiga titik hanya dilakukan untuk aliran angin dari arah utara dan barat laut, dikarenakan aliran angin dari arah barat sejajar dan searah dengan bentang jembatan sehingga tidak perlu dilakukan pengambilan data di ketiga titik. masing-masing arah diambil tiga kali pengambilan data.

4.2.1 Arah Angin Barat

Angin dari arah barat tegak lurus mengenai samping jembatan. Kecepatan yang diukur adalah pada kecepatan 2 m/s, 2.5 m/s, dan 3 m/s. garis pada gambar menunjukkan gambaran *streamline* aliran angin yang bertiup melalui jembatan suramadu. Perubahan warna yang terjadi menunjukkan perubahan kecepatan aliran angin yang terjadi pada saat mengenai jembatan Suramadu. Korelasi warna dan kecepatan sesuai dengan parameter warna yang terdapat di bagian kiri jembatan.

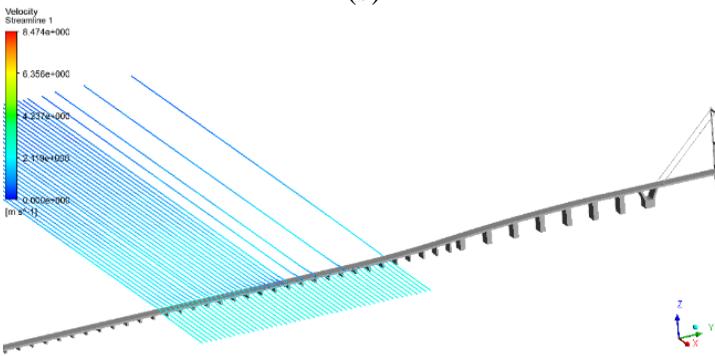
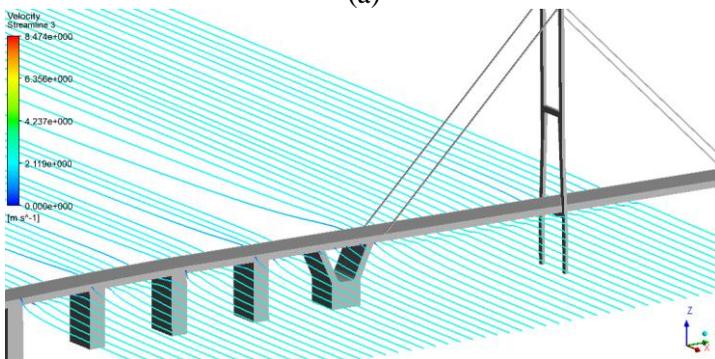
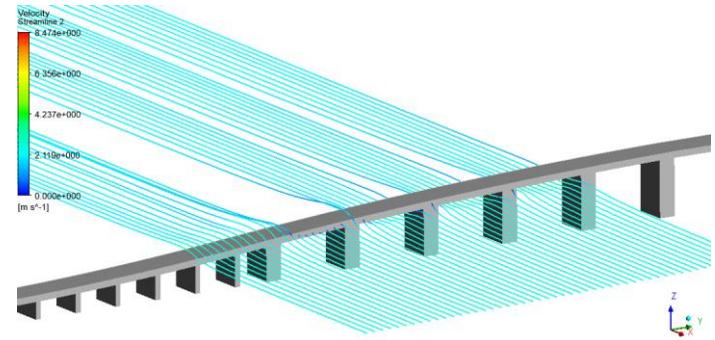
a. Kecepatan 2 m/s

Dari gambar 4.3 bisa dilihat pola aliran angin di tiga titik pada jembatan. Sebelum mengenai jembatan, aliran udara pada simulasi berwarna biru muda. Saat berada di atas jembatan, pola aliran berubah warna menjadi warna hijau. Hal itu menunjukkan bahwa terjadi kenaikan kecepatan, yang menurut parameter berkisar 1 m/s. Tetapi dari gambar bisa dilihat juga bahwa peningkatan tersebut tidaklah besar.

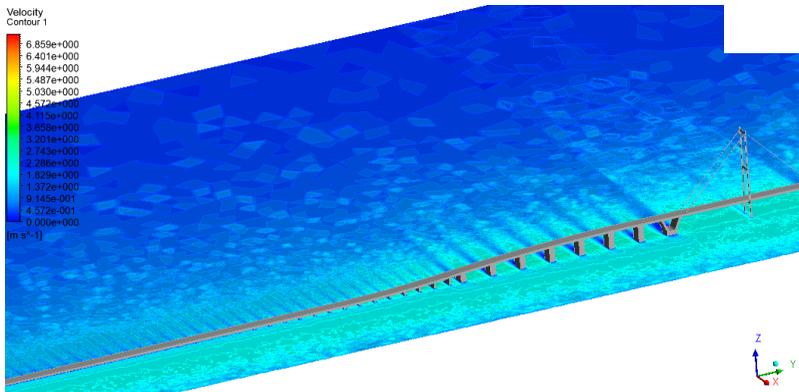


Gambar 4. 3 Pola *streamline* pada kecepatan 2 m/s arah W bagian (a) jalan lurus, (b) tanjakan, dan (c) tengah jembatan

- b. Kecepatan 2.5 m/s
 Hasil Simulasi jembatan berupa bentuk kontur kecepatan angin dan pola *streamline* pada kecepatan 2.5 m/s tercantum pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5



Gambar 4. 4 Pola streamline pada kecepatan 2.5 m/s arah W bagian (a) jalan lurus, (b) tanjakan, dan (c) tengah jembatan

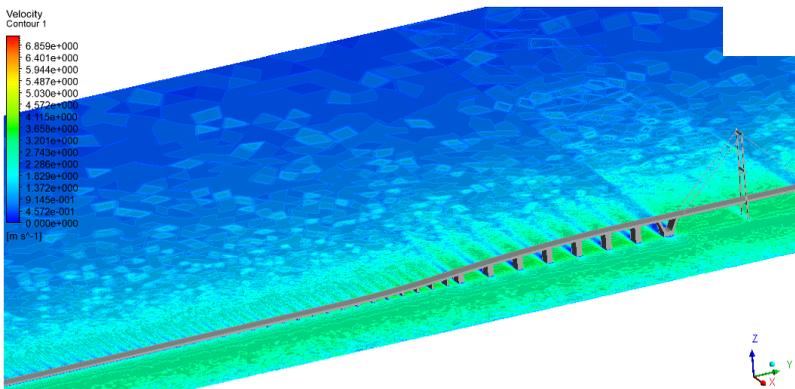


Gambar 4. 5 Plot kecepatan angin pada kecepatan 2.5 m/s arah W

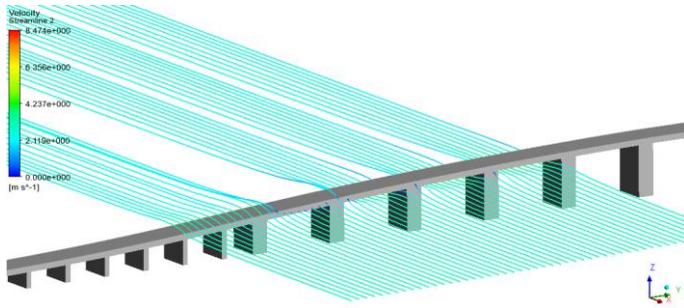
Dari Gambar 4.4 terlihat pola aliran angin pada kecepatan angin 2.5 m /s. hasil yang terlihat tidak berbeda dari Gambar 4.3, yaitu terjadi sedikit kenaikan kecepatan angin di atas jembatan yang menurut parameter berkisar 1 m/s.

c. Kecepatan 3 m/s

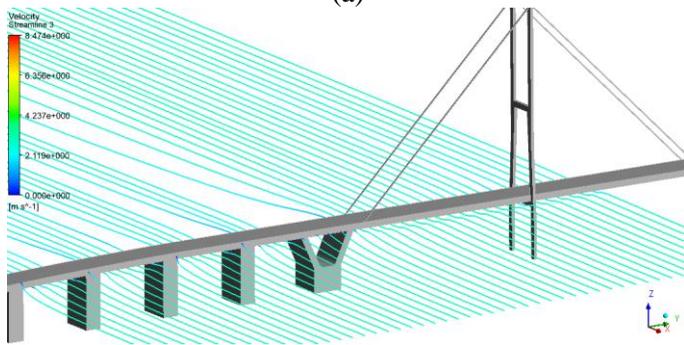
Gambar 4.6 dan 4.7 adalah kontur plot kecepatan angin dan pola *streamline* pada kecepatan angin 3 m/s dari hasil simulasi jembatan.



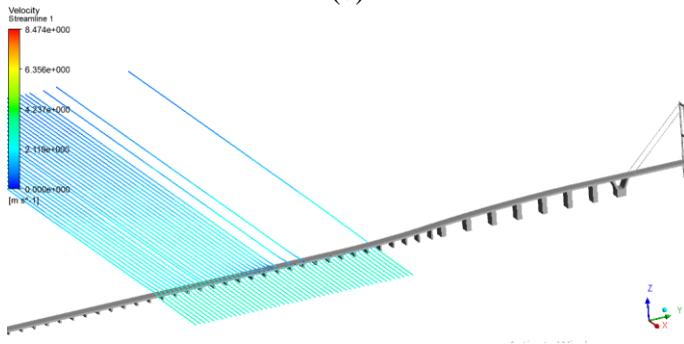
Gambar 4. 6 Plot kecepatan angin pada kecepatan 3 m/s arah W



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.7 Pola Streamline pada kecepatan 3 m/s arah W bagian (a) jalan lurus, (b) tanjakan, dan (c) tengah jembatan

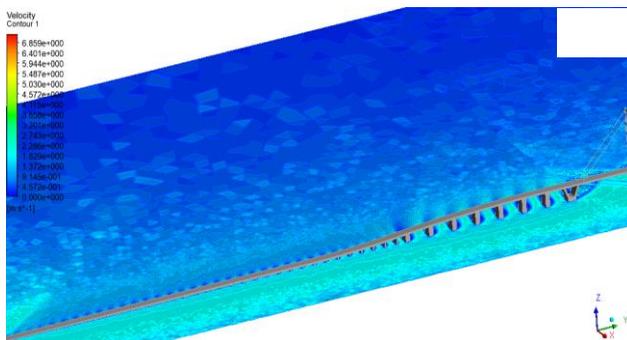
Dari Gambar 4.7 juga tidak terlihat perbedaan yang signifikan dari kecepatan angin 2 m/s dan 2.5 m/s. Saat berada di atas jembatan, pola aliran berubah warna menjadi warna hijau tua. Hal itu menunjukkan bahwa kecepatan aliran angin saat diatas jembatan menyentuh angka 4 m/s. Dimana, telah terjadi kenaikan kecepatan sebesar 1 m/s.

4.2.2 Arah Angin Barat Laut

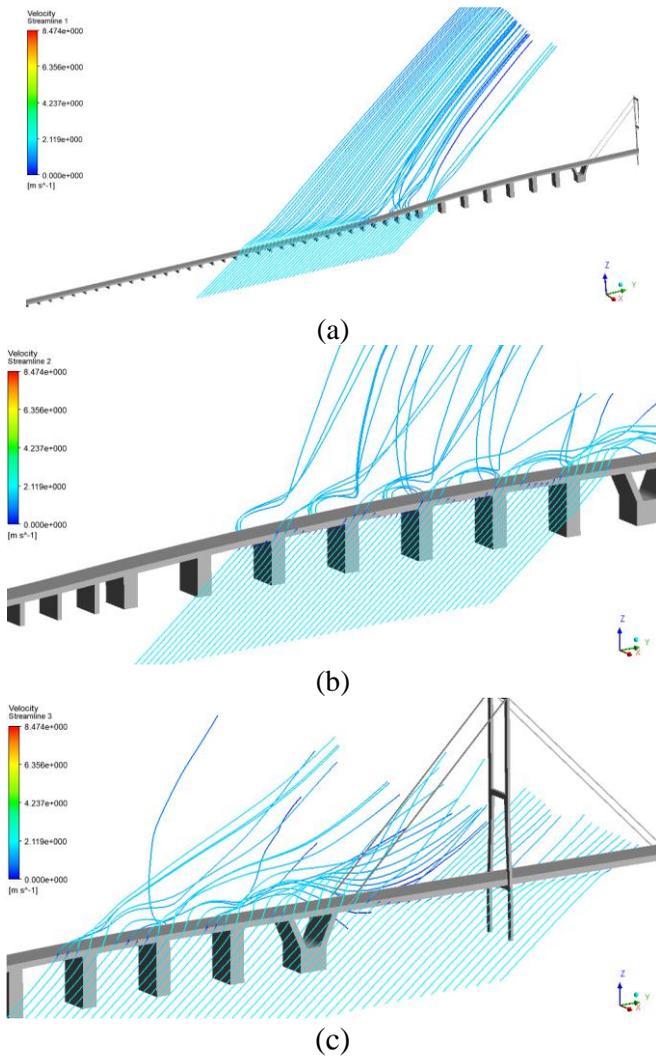
Angin dari arah barat laut berbentuk menyamping mengenai samping jembatan. Kecepatan yang diukur adalah pada kecepatan 2 m/s, 2.5 m/s, dan 3 m/s. garis pada gambar menunjukkan gambaran *streamline* aliran angin yang bertiup melalui jembatan suramadu. Perubahan warna yang terjadi menunjukkan perubahan kecepatan aliran angin yang terjadi pada saat mengenai jembatan Suramadu. Korelasi warna dan kecepatan sesuai dengan parameter warna yang terdapat di bagian kiri jembatan.

a. Kecepatan 2 m/s

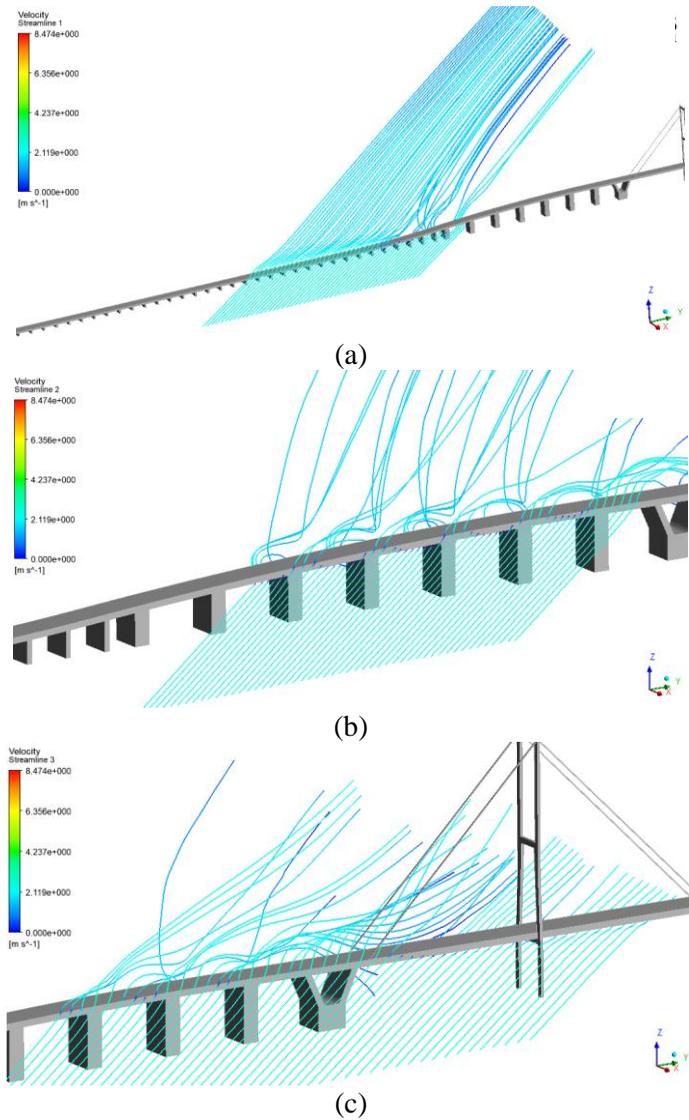
Dari gambar 4.9 bisa dilihat pola aliran angin pada jembatan suramadu. Sebelum mengenai jembatan, aliran udara pada simulasi berwarna biru tua. Saat berada di atas jembatan, pola aliran berubah warna menjadi warna hijau. Pada kecepatan angin 2 m/s arah barat laut, kenaikan kecepatan angin juga cenderung lebih tinggi sedikit daripada angin dari arah barat. Tetapi, perbedaan tersebut tidak terlalu signifikan sehingga bisa dianggap sama.



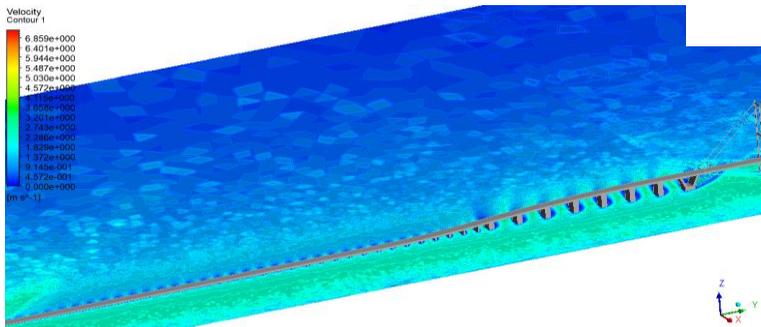
Gambar 4. 8 Plot kecepatan angin pada kecepatan 2 m/s arah NW



Gambar 4.9 Pola Streamline pada kecepatan 2 m/s arah NW bagian (a) jalan lurus, (b) tanjakan, dan (c) tengah jembatan



Gambar 4. 10 Pola Streamline pada kecepatan 2.5 m/s arah NW bagian (a) jalan lurus, (b) tanjakan, dan (c) tengah jembatan



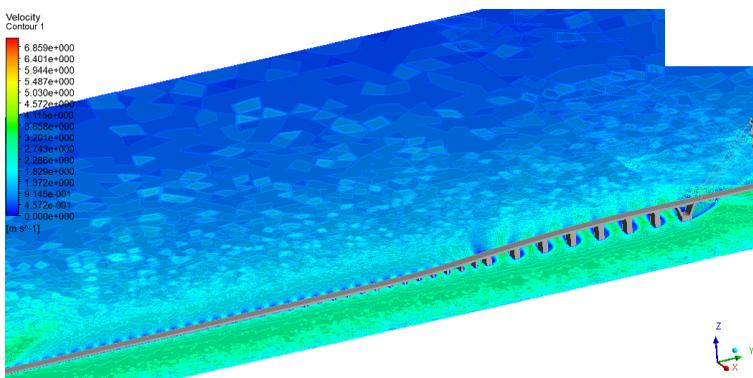
Gambar 4. 11 Plot kecepatan angin pada kecepatan 2.5 m/s arah NW

a. Kecepatan 2.5 m/s

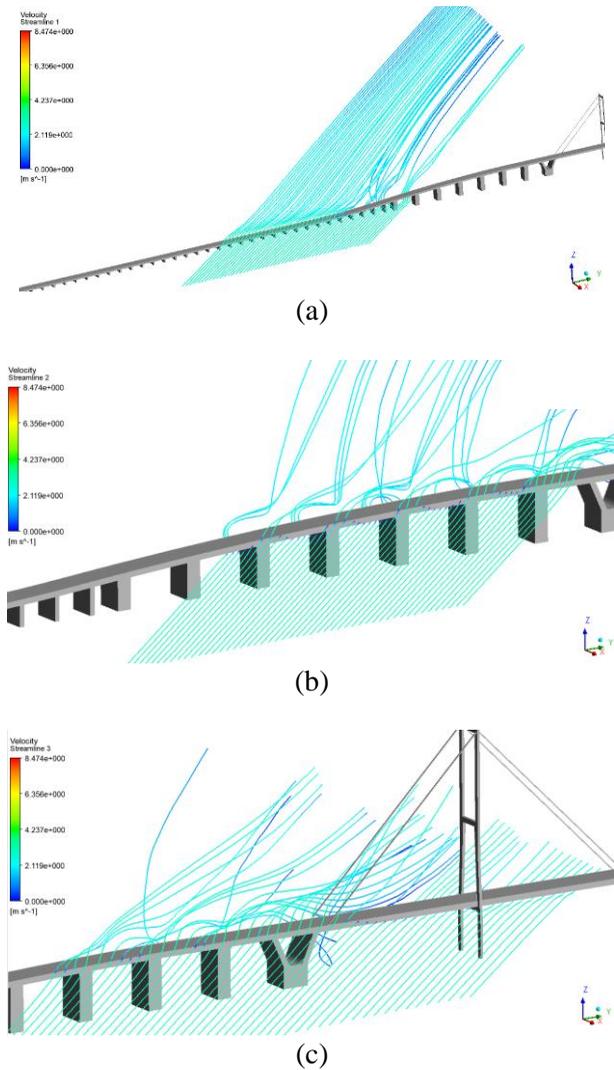
Dari hasil simulasi pada kecepatan angin 2.5 m/s yang ditampilkan pada Gambar 4.10 ini, aliran angin saat mengenai jembatan dan sesudah mengenai jembatan cenderung stabil, sehingga bisa dianggap sama dengan pola pada kecepatan 2 m/s.

b. Kecepatan 3 m/s

Hasil Simulasi jembatan berrupa bentuk kontur kecepatan angin dan pola streamline pada kecepatan 3 m/s arah NW tercantum pada Gambar 4.12 dan Gambar 4.13



Gambar 4. 12 Plot kecepatan angin pada kecepatan 3 m/s arah NW



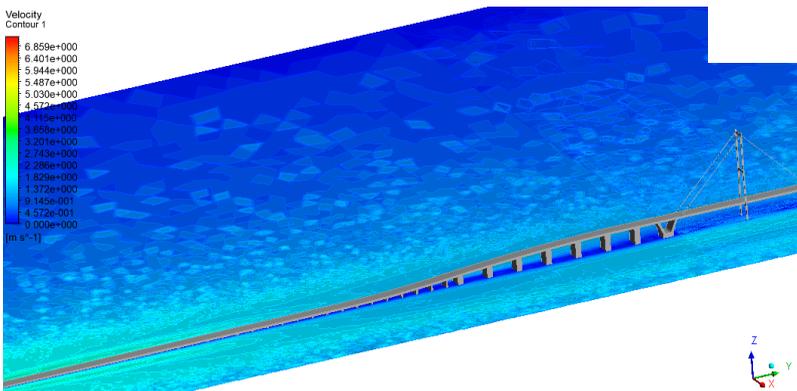
Gambar 4. 13 Pola Streamline pada kecepatan 3 m/s arah NW bagian (a) jalan lurus, (b) tanjakan, dan (c) tengah jembatan

Dari hasil simulasi pada kecepatan angin 3 m/s arah NW pada Gambar 4.13 ini, angin mengalami peningkatan kecepatan yang signifikan, yaitu sebesar 2 m/s. Pada puncak atau atas jembatan kecepatan angin yang berhembus mencapai 5 m/s. Kenaikan kecepatan tersebut terlihat signifikan pada bagian tengah jembatan.

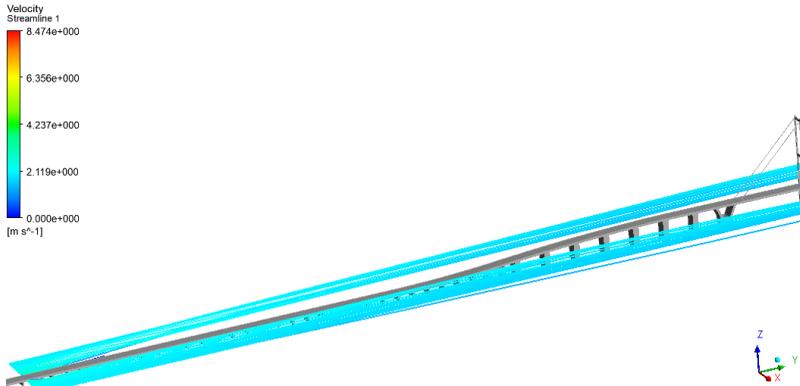
4.2.3 Arah Utara

Angin dari arah Utara sejajar dengan panjang jembatan. Kecepatan yang diukur adalah pada kecepatan 2 m/s, 2.5 m/s, dan 3 m/s. Pada variable ini tidak dilakukan pengambilan dari tiga titik, melainkan hanya dilihat secara keseluruhan saja. Hal ini dikarenakan aliran angin searah dengan jembatan sehingga tidak terjadi perubahan fenomena yang signifikan. Garis pada gambar menunjukkan gambaran *streamline* aliran angin yang bertiup melalui jembatan Suramadu. Perubahan warna yang terjadi menunjukkan perubahan kecepatan aliran angin yang terjadi pada saat mengenai jembatan Suramadu. Korelasi warna dan kecepatan sesuai dengan parameter warna yang terdapat di bagian kiri jembatan.

a. Kecepatan 2 m/s



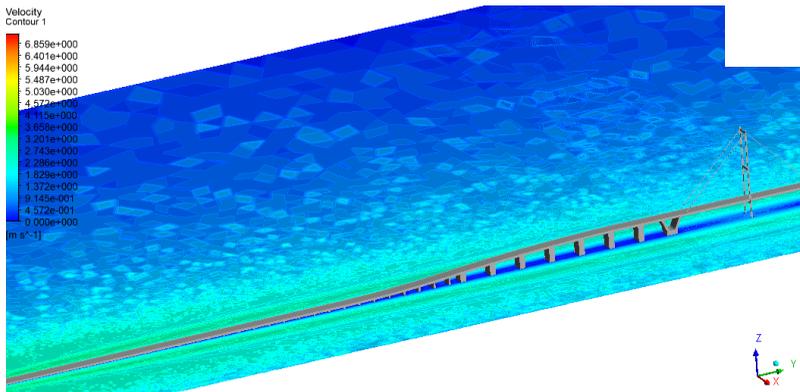
Gambar 4. 14 Plot kecepatan angin pada kecepatan 2 m/s arah N



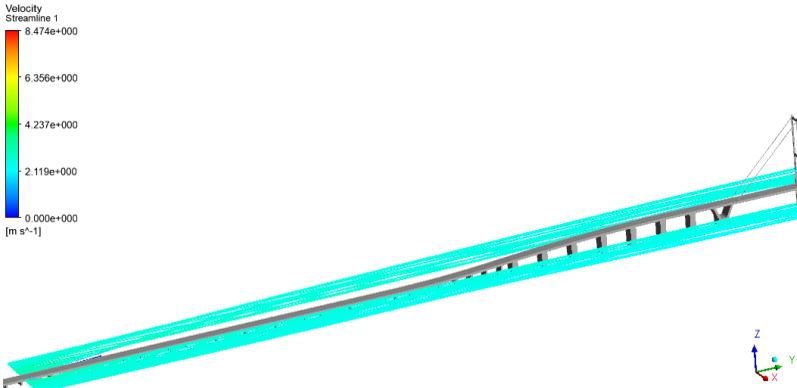
Gambar 4. 15 Pola Streamline pada kecepatan 2 m/s arah N

Karena angin sejajar dengan jembatan, maka angin cenderung tidak mengalami perubahan kecepatan dan tidak terjadi fenomena perubahan aliran angin. Kecepatan angin yang berhembus tetap memiliki kecepatan 2 m/s diatas jembatan.

b. Kecepatan 2.5 m/s



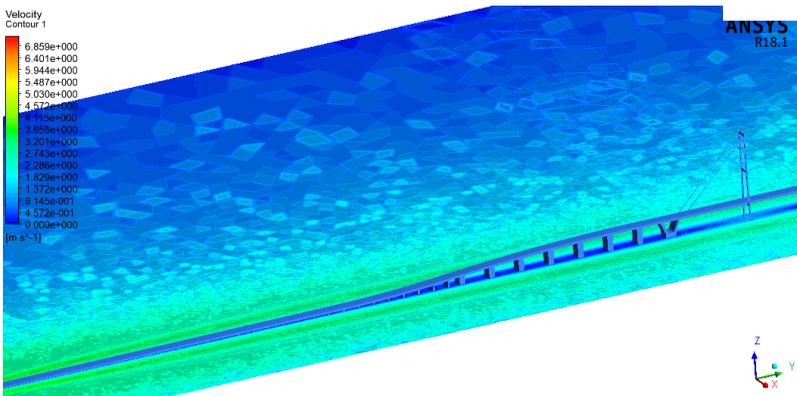
Gambar 4. 16 Plot kecepatan angin pada kecepatan 2.5 m/s arah N



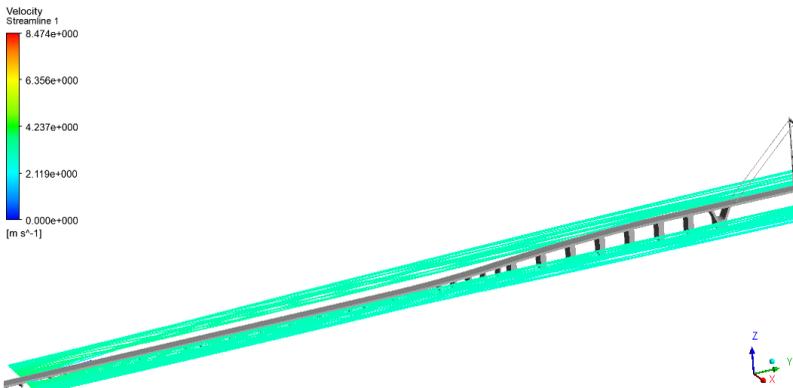
Gambar 4. 17 Pola Streamline pada kecepatan 2.5 m/s arah N

Seperti pada variasi kecepatan 2 m/s, angin cenderung tidak mengalami perubahan kecepatan dan tidak terjadi fenomena perubahan aliran angin, dikarenakan arah angin searah dengan bentang jembatan dan tidak ada penghalang yang menghalangi aliran angin.

c. Kecepatan 3 m/s



Gambar 4. 18 Plot kecepatan angin pada kecepatan 3 m/s arah N



Gambar 4. 19 Pola Streamline pada kecepatan 3 m/s arah N

Pada kecepatan angin 3 m/s ini, terjadi fenomena yang sama dengan variasi kecepatan angin lainnya arah utara. Kecepatan angin yang berhembus tetap memiliki kecepatan 3 m/s diatas jembatan.

4.3 Analisa Distribusi Kecepatan

Dari hasil simulasi pergerakan angin laut yang mengenai jembatan dengan variabel kecepatan 2 m/s, 2.5 m/s, dan 3 m/s serta variasi arah angin yaitu pada arah utara (N), barat (W), dan barat laut (NW) didapatkan fenomena yang sama, yaitu kenaikan kecepatan angin pada saat melewati jembatan suramadu dan berada di atas Jembatan Suramadu.

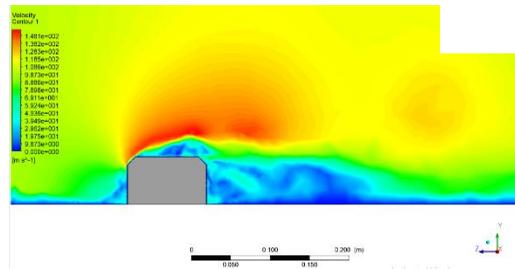
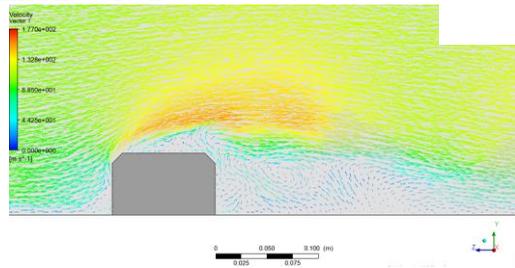
Pada variasi dari arah arah barat, seperti yang terlihat pada Gambar 4.3, Gambar 4.4, dan Gambar 4.7 terdapat kenaikan kecepatan sebesar 1 m/s yang terlihat dari perbedaan gradasi warna ketika sebelum dan setelah melewati jembatan. Pada variasi kedua yaitu dari arah barat laut, kenaikan kecepatan yang terjadi lebih besar, yaitu sebesar 2 m/s. Hal tersebut terlihat pada variasi kecepatan 3 m/s Gambar 4.10 yang meningkat kecepatannya menjadi 5 m/s. sedangkan variasi arah dari utara, posisinya sejajar dengan jembatan Suramadu, dan tidak terjadi perbedaan kecepatan saat melewati jembatan.

Berdasarkan bagian jembatan, kenaikan kecepatan tertinggi berada pada area tengah jembatan. Hal itu bisa terjadi dikarenakan pada bagian tengah jembatan terdapat tiang penyangga. Menurut teori,

aliran angin akan terpecah jika menabrak suatu benda. Pada bagian tengah jembatan, benda yang menghalangi aliran angin lebih banyak jika dibandingkan dengan dua titik pengambilan lainnya, yaitu pada jalan awal dan bagian tanjakan pada jembatan.

Perubahan kecepatan berupa kenaikan bisa terjadi karena adanya aliran angin yang menabrak pinggiran jembatan. Pada kasus ini bangunan jembatan tersebut dapat dikategorikan sebagai *bluff body*. Menurut teori, jika suatu aliran angin mengenai bangunan atau bentuk *bluff body*, maka akan terbentuk *vortex* dibelakang benda tersebut, dimana hal tersebut bertepatan di atas jembatan atau di jalan raya tempat kendaraan lewat diatas jembatan. Pada variasi arah angin dari barat, tidak terjadi efek *vortex*, dikarenakan benda yang berada di jalur angin tidak bisa dikatakan sebagai *bluff body*.

4.4 Analisa Aliran Vortex



Gambar 4. 20 Aliran (a) *streamline* dan (b) kontur *vortex* pada tepi jembatan

Pada gambar diatas, telah didapatkan hasil aliran vortex pada aliran angin yang mengenai bagian pinggir jembatan jembatan. Pada gambar 4.20 bagian (a), garis menunjukkan gambaran aliran angin yang bertiup melalui Jembatan Suramadu. Angin bertiup dari arah kiri kekanan. Warna menunjukkan kondisi kecepatan angin yang terjadi, sesuai dengan parameter warna yang terdapat di bagian kiri gambar. Sedangkan pada gambar 4.20 bagian (b) menjelaskan kondisi *vorticity* pada jembatan suramadu dengan indikator warna sebagai petunjuk kondisi kecepatan pada tempat tertentu, sesuai dengan parameter yang terdapat di bagian kiri gambar. Dari gambar diketahui terjadi fenomena vortex dibelakang pinggiran jembatan. Hal itu disebabkan karena bangunan tersebut termasuk kategori *bluff body* dan terjadi penurunan kecepatan hamper dua kali lipatnya jika diliat dari perbedaan warna aliran menurut parameter. Sementara itu, diatas bagian tersebut terjadi fenomena *wake* dari aliran udara yang terhalang *bluff body* yang kemudian terjadilah kenaikan gaya drag sehingga aliran menumpuk diatas *bluff body*. Hal tersebut jika dilihat dari parameter warna terjadi kenaikan kecepatan hingga dua kali lipat. Tetapi hal tersebut hanya terjadi secara singkat dan tidak terlalu signifikan, sebelum aliran angin kembali ke kecepatan semula.

4.5 Pengaruh Angin terhadap Kendaraan

Menurut Xu dan Guo struktur Jembatan juga dapat berpengaruh pada aliran udara di sekitar jembatan. Kecepatan angin yang bergerak di atas daratan dan lautan sangat berbeda. Angin yang bergerak di daratan akan cenderung mengikuti keadaan permukaan daratan, berbeda jika angin yang berhembus di atas lautan maka ia akan ikut mempengaruhi bentuk muka air laut, bahkan pergerakan arus di atas laut. Sehingga angin lebih bebas bergerak di atas lautan daripada di daratan. Oleh karena itu jembatan yang dibangun di atas laut akan lebih berisiko terhadap angin terutama angin samping (*crosswind*) (Zhou, 2010).

Crosswind pada penelitian ini disebabkan oleh bangunan jembatan yang berada diatas permukaan air laut. *Crosswind* terjadi karena angin laut yang menabrak pinggiran jembatan akan mengalami gaya *drag* yang kemudian menimbulkan *wake* diatas

jembatan sehingga kecepatan angin yang berhembus diatas jembatan akan mengalami peningkatan seperti hasil simulasi diatas. Sesuai pembahasan pada Bab 4.3, kenaikan kecepatan angin tertinggi adalah yang berhembus dari arah barat laut, dan bagian yang mengalami peningkatan kecepatan tertinggi ada di bagian tengah jembatan yang terdapat tiang penyangga jembatan.

Angin *wake* yang timbul dari pinggir jembatan dapat menjadi *crosswind* bagi kendaraan yang melaju diatas jembatan. Argentini et al. (2011) mengatakan *crosswind* sangat berbahaya bagi pengendara dengan kecepatan 90 km/h jika angin yang berhembus diatas 10 m/s. kendaraan yang rentan terkena efek *crosswind* adalah kendaraan yang memiliki *body* tinggi dan lebar, seperti truk pick up dan kontainer. Hal itu disebabkan karena semakin besar *body* yang menghalangi aliran angin, maka efek *drag* yang terjadi akan semakin besar, sehingga berpeluang membuat kendaraan terbanting atau terdorong.

Dari penelitian diatas, arah angin yang berpotensi menghasilkan *crosswind* adalah aliran angin yang mengarah dari arah barat dan barat laut. Hal tersebut disebabkan kedua aliran angin tersebut mengarah dari samping kendaraan sehingga menghasilkan efek *wake* saat menabrak jembatan. Untuk kecepatan, pada penelitian kali ini data angin yang didapatkan cenderung rendah, yaitu 2 m/s, 2.5 m/s, dan 3 m/s. Dengan kenaikan kecepatan sebesar 2 m/s didapatkan kecepatan tertinggi pada atas jembatan sebesar 5 m/s. Hal itu menjadikan fenomena *crosswind* pada penelitian kali ini masih dianggap aman.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan data hasil simulasi serta analisa data yang telah dilakukan, maka kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Karakteristik angin setelah melewati jembatan mengalami kenaikan kecepatan sebesar 2 m/s yang disebabkan efek *wake* setelah angin menabrak jembatan. Efek terbesar terjadi pada bagian tengah jembatan.
- b. Efek *wake* yang terjadi dapat menimbulkan *crosswind* bagi kendaraan terutama kendaraan besar seperti truk. Dengan kecepatan maksimum diatas jembatan sebesar 5 m/s maka *crosswind* yang terjadi belum berbahaya bagi kendaraan jika mengacu pada batas maksimal kecepatan angin 11 m/s untuk motor dan 17 m/s untuk kendaraan
- c. Fenomena yang terjadi pada Jembatan Suramadu adalah terbentuknya *vortex* di area belakang pembatas jembatan yang diakibatkan benturan antara aliran angin dan *bluff body* pada jembatan.

5.2 Saran

Adapun saran yang bisa diberikan dari tugas akhir ini adalah mengenai arah aliran angin yang lebih beragam sehingga lebih beragam dan jika memungkinkan ditambah obyek kendaraan diatas jembatan agar lebih diketahui bagaimana efek langsung saat aliran angin pada kecepatan tertentu mengenai kendaraan. Selain itu jika memungkinkan kecepatan angin ditambah variasi keragamannya agar lebih terlihat perbedaannya.

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, J. D. (1995). *Computational Fluid Dynamics : The Basics with Applications*. McGraw-Hill.
- Aprianto, D. (2014). Analisis Aliran Udara Pada Jembatan Suramadu dengan menggunakan Metode Volume Hingga.
- Argentini, T. (2011). Crosswind effect on a vehivle crossing the wake of a bridge pylon.
- Baker, C. (2009). Wind-Induced Accident of Road Vehicle.
- Carreiro, J. (2011). Two Dimensional Modeling of Wind Effects on a Bridge Section using Finite Difference Method.
- Dinham, T. A., Craddock, C., Lebas, A., & Ganguly, A. (2008). Use of CFD for Hull Form and Appendage Design Assessment on a Offshore Patrol Vessel and Identification of a Wake Focussing Effenct.
- Erdem, S. (2016). Assessment of Aerodynamic Response of the Nissibi Cable-Stayed Bridge using Three-Dimensional Computational Fuid Dynamics.
- Fox, & Robert, W. (2003). *Introduction to Fluid Mechanics: 6th Edition*. USA.
- Liaw, K. (2005). Simulation of Flow around Bluff Bodies and Bridge Deck Sections using CFD.
- Munson, B. R. (2009). *Fundamentals of Fluid Mechanics*. USA: Wiley.
- NASA. (2008, Juli 2008). *Computational Fluid Dynamics (CFD) Verification and Validation Web Site of the NPARC Alliance*. Diambil dari www.grc.nasa.gov
- S. Charuvisit. (2004). Experimental and Semi-Analytical Studies on the Aerodynamic Forces Acting on a Vehicle Passing Through the Wake of a Bridge Tower in Cross Wind.

- Wang, B., Xu, Y.-L., & Zhu, L.-D. (2014). Crosswind Effect Studies on Road Vehicle Passing by Bridge Tower using Computational Fluid Dynamics.
- Zhou, Q. (2010). Study on Wind Environment over a Bridge Deck Near Tower using CFD with LES Model and Wind Tunnel Test.