

TESIS (TM 142501)

KARAKTERISTIK ALIRAN MELINTASI TIGA BUAH SILINDER SIRKULAR YANG TERSUSUN SECARA EQUILATERAL-TRIANGULAR DENGAN PENAMBAHAN INLET DISTURBANCE BODY (IDB)

"Studi Kasus Variasi Sudut Pengganggu $20^{\circ} \le \theta \le 60^{\circ}$ pada Jarak antar Silinder S/D : 2"

NOVI INDAH RIANI 2113202010

Dosen Pembimbing Dr. WAWAN ARIES WIDODO, ST., MT.

PROGRAM MAGISTER BIDANG KEAHLIAN REKAYASA KONVERSI ENERGI JURUSAN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER SURABAYA 2015



TESIS (TM 142501)

CHARACTERISTICS OF FLOW ACROSS THREE CIRCULAR CYLINDER ARRANGED IN EQUILATERAL-TRIANGULAR WITH ADDITION OF INLET DISTURBANCE BODY (IDB)

"Case Study for Angle Variation of Inlet Disturbance Body: $20^0 \le \theta \le 60^0$ on Distance between Main Cylinder (S/D) : 2"

NOVI INDAH RIANI 2113202010

Academic Advisor Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

MASTER PROGRAM CONVERSION OF ENERGY ENGINEERING MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER SURABAYA 2015 Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Magister Teknik (MT) di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: Novi Indah Riani Nrp. 2113202010

Tanggal Ujian: 26 Juni 2015 Periode Wisuda: September 2015

Disetujui oleh:

1.Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

NIP. 1971 0405 1997021001

- Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.
 NIP. 1964 1228 1990 031002
- Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA.
 NIP. 1960 0129 1987 011001
- 4. Vivien Supandhani D., ST., M.Eng., Ph.D. NIP. 1981 0529 2003 122001

(Pembimbing)



(Penguji)

(Penguji)

Direktur Program Pascasarjana,

Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT NIP. 1964 0405 1990 021001

KARAKTERISTIK ALIRAN MELINTASI TIGA BUAH SILINDER SIRKULAR YANG TERSUSUN SECARA EQUILATERAL-TRIANGULAR DENGAN PENAMBAHAN INLET DISTURBANCE BODY (IDB) "Studi Kasus Variasi Sudut Pengganggu 20⁰ ≤ 0 ≤ 60⁰ pada Jarak antar Silinder S/D : 2"

| Nama | : Novi Indah Riani |
|------------------|------------------------------------|
| NRP | : 2113202010 |
| Jurusan | : Teknik Mesin FTI-ITS |
| Dosen Pembimbing | : Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT. |

Abstrak

Ada banyak ulasan penting tentang karakteristik aliran di *downstream* silinder sirkular. Salah satu masalah dasar dari mekanika fluida yaitu perhitungan daerah aliran di sekitar permukaan silinder. *Horseshoe vortices, vortex shedding,* dan daerah *wake* dari silinder sirkular pada bilangan Reynolds baik rendah maupun tinggi telah diteliti. Untuk mengurangi daerah *wake* yang lebar dapat dilakukan dengan mengurangi gaya *drag* yang dihasilkan ketika aliran fluida melalui *bluff body* pada sebuah saluran. Gaya *drag* yang semakin kecil dapat dilakukan dengan menunda terjadinya separasi aliran. Jika separasi aliran tertunda lebih awal, maka gaya *drag* yang dihasilkan akan berkurang. Salah satu cara untuk mengurangi gaya *drag* adalah dengan menambahkan bodi pengganggu pada bagian *upstream*.

Penelitian ini dilakukan secara eksperimen dan numerik, dimana benda uji yang digunakan berupa tiga buah silinder sirkular (*main bluff body*) berdiameter (D) 25 mm yang tersusun secara *equilateral-triangular* dengan penambahan bodi pengganggu pada bagian *upstream* masing-masing silinder utama. Jarak antar silinder S/D yang digunakan tetap, yaitu: 2, sedangkan untuk variasi yang digunakan adalah variasi sudut pengganggu yaitu: 20°, 30°, 40°, dan 60°. Silinder pengganggu berdiameter (d) 4 mm dengan gap (δ) 0.4 mm dari permukaan silinder *upstream*. Untuk penelitian secara numerik menggunakan *solver* dua dimensi (2D)-*URANS* (*Unsteady Reynolds Averaged Navier's Stokes*) dengan *turbulence viscous model k-* ω *Shear Stress Transport (k-\omega SST)*. Bilangan *Reynolds* yang digunakan baik eksperimen dan numerik sebesar 2.2 x10⁴.

Hasil yang diperoleh menunjukkan adanya reduksi koefisien gaya *drag* yang terjadi pada konfigurasi *equilateral triangular* dibandingkan dengan tanpa adanya penambahan IDB. Hal ini dibuktikan dengan reduksi gaya *drag* terbesar yang terjadi pada sudut *IDB* 30⁰ untuk hasil eksperimen sebesar 0,258; 0,705; 0,607 pada masing-masing silinder 1, 2, dan 3. Sedangkan hasil numerik nilai koefisien gaya *drag* lebih kecil dibandingkan hasil eksperimennya.

Kata kunci: Tiga Silinder sirkular, susunan equilateral-triangular, koefisien drag, bodi pengganggu, $k - \omega$ Shear Stress Transport ($k - \omega$ SST)

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

CHARACTERISTICS OF FLOW ACROSS THREE CIRCULAR CYLINDER ARRANGED IN EQUILATERAL-TRIANGULAR WITH ADDITION OF INLET DISTURBANCE BODY (IDB)

"Case Study for Angle Variation of Inlet Disturbance Body: $20^{0} \le \theta \le 60^{0}$ on Distance between Main Cylinder (S/D) : 2"

| | Name | : Novi Indah Riani |
|-----|------------|------------------------------------|
| 5 | NRP | : 2113202010 |
| | Department | : Teknik Mesin FTI-ITS |
| 2 3 | Lecturer | : Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT. |
| | | |

Abstract

There are many critical review of the characteristics of the flow in the downstream circular cylinder. One of the basic problems of fluid mechanics is the calculation of the surface area of the flow around the cylinder. Horseshoe vortices, vortex shedding, and local wake of a circular cylinder at low Reynolds numbers and high either been investigated. To reduce the wide wake region can be done by reducing the drag force is generated when the flow of fluid through the bluff body in a channel. The smaller the drag force that can be done by delaying the flow separation. If the early flow separation is delayed, then the resulting drag force will be reduced. One way to reduce the drag force is to add Inlet Disturbance Body (IDB) on the upstream cylinder.

This study was carried out experimentally and numerically, where the specimen used in the form of three circular cylinder (main bluff body) diameter (D) of 25 mm are arranged in equilateral-triangular with addition of inlet disturbance body on each upstream of main cylinder. The distance between the cylinder S/D are used remain, namely: 2, while for the variation that is used is a variation of the angle inlet disturbance body: 20° , 30° , 40° , and 60° , respectively. Diameter of inlet disturbance body (d) 4 mm with a gap (δ) of 0.4 mm from the surface of upstream cylinder. To study numerically using the solver two-dimensional (2D) - URANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes) with viscous turbulence k- ω models Shear Stress Transport (SST k- ω). Reynolds number is used both experimentally and numerically by 2.2 x10⁴.

The results showed a reduction in the coefficient of drag force that occurs in equilateral triangular configuration than without the addition of IDB. This is evidenced by the reduction of the biggest drag force that occurs at an angle of $IDB = 30^{\circ}$ for the experimental results of 0.258; 0.705; .607 in each of the cylinders 1, 2, and 3. While the results of the numerical value of the coefficient of drag force is smaller than the results of experiments.

Kata kunci: Three circular cylinder, equilateral-triangular arrangement, drag coefficient, inlet disturbance body, k- ω Shear Stress Transport (k- ω SST)



KATA PENGANTAR

Dengan mengucap syukur alhamdulillah atas rahmat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan berkah, rahmat, taufiq, serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul **"Karakteristik Aliran Melintasi Tiga Buah Silinder Sirkular Yang Tersusun Secara** *Equilateral*-*Triangular* **Dengan Penambahan** *Inlet Disturbance Body* (**IDB**)". Walaupun berbagai halangan dan hambatan yang penulis temukan dalam proses penulisan tesis ini, namun akhirnya penulis dapat menyelesaikannya.

Keberhasilan tesis ini tidak lepas dari bantuan serta dukungan dari berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi - tingginya kepada:

- 1. Prof. Ir. Sutardi, M. Eng., Ph.D selaku Ketua Jurusan Pascasarjana Teknik Mesin beserta staf.
- 2. Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT. selaku dosen pembimbing atas waktu yang diberikan, diskusi, bimbingan dan nasehat selama pengerjaan dan penulisan tesis ini.
- Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA., Vivien Supandhani D., ST., M. Eng., Ph.D., Prof. Ir. Sutardi, M. Eng., Ph.D selaku penguji sidang tesis.
- 4. Mama dan ayah tercinta, kak Rara, dek Brian, dek Kresna, mas Alvi, dan Hennu sebagai keluarga yang selalu mendukung dan memberikan semangat agar menyelesaikan pendidikan tepat waktu.
- Rekan-rekan mahasiswa Rekayasa Konversi Energi ITS dan teman-teman Laboratorium Mekanika Fluida yang telah memberikan bantuan dan dukungan selama bimbingan tesis serta pihak-pihak yang telah membantu dalam penyusunan tesis ini yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.



Penulis menyadari akan kekurangan dalam penulisan tesis ini, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran agar tesis ini bisa lebih baik lagi. Akhir kata penulis mohon maaf atas segala kesalahan dan kekurangan. Semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, 15 Juli 2015

Penulis

DAFTAR ISI

| | ABSTRAK |) iii |
|---|--|-------|
| | ABSTRACT | v |
| | KATA PENGANTAR | vii |
| | DAFTAR ISI | ix |
| ۲ | DAFTAR TABEL | xi |
| | DAFTAR GAMBAR | xiii |
| | BAB 1 PENDAHULUAN | 1 |
| | 1.1 Latar Belakang | 1 |
| | 1.2 Rumusan Masalah | 3 |
| | 1.3 Tujuan Penelitian | 4 |
| | 1.4 Manfaat Penelitian | 5 |
| | 1.5 Batasan Masalah | 5 |
| | BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI | 7 |
| R | 2.1 Konsep Boundary Layer | 7 |
| | 2.2 Aliran Viscous dan Inviscid | 8 |
| | 2.3 Pengaruh Bodi Pengganggu terhadap Reduksi Gaya Drag pada | |
| | Silinder Sirkular | 9 |
| | 2.4 Pengaruh Variasi Bodi Pengganggu terhadap Visualisasi Profil | |
| | Kecepatan | 10 |
| | 2.5 Pengaruh Penggunaan Inlet Disturbance Body (IDB) Terhadap | |
| | Reduksi Gaya Hambat Pada Tiga Silinder Sirkular Dengan Susunan | |
| | Stagger | 13 |
| | 2.6 Karakteristik Aliran pada Tiga Silinder Sirkular yang Disusun Secara | |
| | Equilateral-triangular | 16 |
| R | 2.7 Pengaruh Intensitas Turbulensi pada Sisi <i>Free Stream</i> Terhadap | |
| | Reduksi Gaya Drag | 18 |
| | BAB 3 METODE PENELITIAN | 21 |
| | | |

-

| | adding |
|--|--------|
| 3.1 Eksperimen | 21 |
| 3.2 Simulasi Numerik dengan Fluent 6.3.26 | 33 |
| BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN | 43 |
| 4.1 Distribusi Koefisien Tekanan Silinder pada Tiga Silinder | |
| Sirkular yang Disusun secara Equilateral Triangular | 44 |
| 4.2 Koefisien Drag Pressure, pada Tiga Silinder Sirkular yang | |
| Disusun secara Equilateral Triangular | 63 |
| 4.3 Karakteristik Aliran Melintasi Tiga Silinder Sirkular yang | 1 |
| Disusun secara Equilateral Triangular | 66 |
| BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN. | 73 |
| 5.1 Kesimpulan | 73 |
| 5.2 Saran | 74 |
| DAFTAR PUSTAKA | 75 |
| | 77 |



DAFTAR GAMBAR

| | Gambar 2.1 Skema <i>boundary layer</i> | 7 |
|------|--|-------|
| | Gambar 2.2 Aliran fluida melalui silinder sirkular | 8 |
| | Gambar 2.3 Variasi sudut bodi silinder sirkular pengganggu terhadap | |
| | silinder utama. | 9 |
| | Gambar 2.4 Pengaruh angular position | 10 |
| | Gambar 2.5 Grafik distribusi tekanan silinder | 17 11 |
| | Comber 2.6 Velocity nathling system and silinder second tendem | 12 |
| | | 12 |
| | Gambar 2.7 Geometri Penelitian (Bantacut, 2014) | 13 |
| | Gambar 2.8 Grafik distribusi koefisien drag pressure (C _{Dp}) pada | |
| | konfigurasi stagger | 15 |
| | Gamba <mark>r 2.9</mark> Konfig <mark>ura</mark> si tiga s <mark>ilin</mark> der dala <mark>m sa</mark> tu gru <mark>p (G</mark> u &Sun, 2000) | 17 |
| | Gambar 2.10 Time-mean Pressure Distribution | 18 |
| | Gambar 2.11 Pengaruh intensitas turbulensi terhadap coefficient of | |
| U.S. | drag (C _D) pada silinder sirkular | 19 |
| - | Gambar 3.1 Instalasi penelitian | 22 |
| | Gambar 3.2 Grafik Kalibrasi hubungan bacaan manometer dengan arus | |
| | pressure tranducer | 27 |
| | Gambar 3.3 Domain simulasi numerik | 34 |
| | Gambar 3.4 Hasil Meshing 2D | 35 |
| S. | Gambar 3.5 Lift convergence history | 38 |
| - | Gambar 3.6 Contoh pengambilan nilai y ⁺ | 40 |
| | Gambar 3.7 <i>Flowchart</i> penelitian | 42 |
| | Gambar 4.1 Grafik distribusi koefisien tekanan silinder, | |
| | tanpa IDB (θ =0°) pada <i>time-averaged</i> | 46 |
| | Gambar 4.2 Grafik distribusi koefisien tekanan silinder, | |
| |) sudut IDB (θ =20°) pada time-averaged | 48 |
| | Gambar 4.3 Grafik distribusi koefisien tekanan silinder, | |
| | sudut IDB (θ =30°) pada <i>time-averaged</i> | 50 |
| | Gambar 4.4 Grafik distribusi koefisien tekanan silinder, | |
| | sudut IDB (θ =40°) pada <i>time-averaged</i> | 52 |
| | Gambar 4.5 Grafik distribusi koefisien tekanan silinder, | |
| | sudut IDB (θ =60°) pada time-averaged | 55 |

| Gambar 4.6 Grafik distribusi koefisien tekanan silinder pada berbagai | |
|---|----|
| sudut IDB hasil eksperimen | 57 |
| Gambar 4.7 Grafik distribusi koefisien tekanan silinder pada berbagai | |
| sudut IDB hasil numerik | 60 |
| Gambar 4.8 Grafik distribusi profil kecepatan di belakang konfigurasi | |
| equilateral triangular | 62 |
| Gambar 4.9 Koefisien gaya $drag$ pada berbagai variasi sudut IDB (θ) | 65 |
| Gambar 4.10 Grafik distribusi profil kecepatan di belakang | |
| konfigurasi <i>equilateral triangular</i> | 69 |
| | |



DAFTAR TABEL

| | Tabel 3.1 | Spesifikasi Inverter. | 25 |
|----|-----------|--|----|
| | Tabel 3.2 | Parameter yang Berpengaruh | 29 |
| | Tabel 3.3 | Grid Independent untuk meshing simulasi | 38 |
| J. | Tabel 3.4 | Range waktu pengambilan CL | 39 |
| | Tabel 3.5 | Nilai y ⁺ | 40 |
| | Tabel 4.1 | Koefisien drag hasil eksperimen | 63 |
| | Tabel 4.2 | Koefisien drag hasil numerik | 65 |
| | Table 4.3 | Nilai Strouhal <i>number</i> hasil numerik | 66 |
| | | | |

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada dunia industri, *bluff body* seperti silinder sirkular atau elips sering digunakan dalam berbagai bentuk, misalnya konstruksi gedung, *airfoil, heat exchanger,* cerobong asap, menara reaksi kimia, sistem anjungan minyak lepas pantai, balkon, dan lain sebagainya.

Ada banyak ulasan penting tentang karakteristik aliran di downstream silinder sirkular. Salah satu masalah dasar dari mekanika fluida yaitu perhitungan daerah aliran di sekitar permukaan silinder. Horseshoe vortices, vortex shedding, dan daerah wake dari silinder sirkular pada bilangan Reynolds baik rendah maupun tinggi merupakan topik lama yang menjadi perhatian untuk diteliti. Untuk mengurangi daerah wake yang lebar dapat dilakukan dengan mengurangi gaya drag yang dihasilkan ketika aliran fluida melalui bluff body pada sebuah saluran. Gaya drag yang semakin kecil didapatkan dengan menunda terjadinya separasi aliran lebih ke belakang. Jika separasi aliran tertunda, maka gaya drag yang dihasilkan akan berkurang, sehingga wake dibelakang silinder pun semakin kecil. Salah satu cara untuk mengurangi gaya drag adalah dengan menambahkan bodi pengganggu pada bagian upstream.

Pemberian bodi pengganggu merupakan salah satu cara untuk memperoleh performa terbaik dengan gaya *drag* yang kecil. Dengan pemberian bodi pengganggu maka akan menunda letak titik separasi pada *main bluff body*. Hal ini dikarenakan kandungan vortisitas pada *shear layer* yang dihasilkan oleh pengganggu akan mampu mempercepat terbentuknya *boundary layer* turbulen. Dengan adanya dominasi lapis batas turbulen pada permukaan *main bluff body* akan menyebabkan terjadinya penundaan separasi lebih ke belakang, sehingga *wake* yang dihasilkan di belakang silinder pun diharapkan semakin kecil. Usaha untuk menunda separasi aliran tersebut telah banyak dilakukan oleh peneliti-peneliti terdahulu. Alam, dkk (2003) meneliti pengaruh penggunaan dua buah bodi pengganggu berupa silinder sirkular terhadap silinder sirkular yang disusun secara tunggal, *side by side* maupun tandem. Penambahan dua buah bodi pengganggu menggunakan sudut α sebagai *upstream*. Dengan penambahan bodi pengganggu tersebut, maka didapatkan fenomena *reattactment* pada beberapa variasi sudut. Fenomena *reattachement* tersebut menyebabkan separasi jauh lebih tertunda.

Widodo dan Hidayat (2014) melakukan penelitian terhadap penambahan *Inlet Disturbance Body* (IDB) yang diletakkan dibagian *upstream* silinder sirkular tunggal untuk mengurangi koefisien gaya *drag* dan *pressure drop* pada saluran sempit. Dengan penambahan IDB pada posisi tertentu, koefisien gaya *drag* dan *pressure drop* mengalami penurunan yang cukup signifikan. Penurunan koefisien gaya *drag* dan *pressure drop* yang terbaik terjadi pada sudut *angle* 30°.

Zhifu & Tianfeng (2000) mengkaji tentang pola aliran pada tiga silinder sirkular yang disusun secara *equilateral-triangular* dengan menvariasikan *spacing ratio* N/d mulai 1.7 hingga 5.0, dimana N adalah jarak antara pusat silinder yang berdekatan dan d adalah diameter dari silinder. Dengan adanya variasi *spacing ratio*, didapatkan distribusi tekanan pada masing-masing silinder sangat mempengaruhi terbentuknya *shear layer* dan *wake* dibagian belakang silinder. Pola aliran yang terjadi karena silinder yang berdekatan akan mengakibatkan *reattachment* pada *shear layer* dan *wake*.

Tatsuno, dkk (1997) meneliti pengaruh gangguan antara tiga silinder yang disusun secara *equidistantly* pada aliran yang seragam. Penelitian ini menvariasikan *incidence angles* dan *spacing ratio*. Tekanan statis, koefisien *drag* dan koefisien *lift* di sekitar silinder masing-masing dihitung. Pengaruh dari gangguan aliran antara tiga silinder yang paling besar ketika *spacing ratio* kecil. Kecenderungan sudut dengan aliran seragam sangat mempengaruhi koefisien *drag* dan koefisien *lift*, arah dari gaya yang diberikan pada masing-masing silinder dan pola aliran sekitar silinder. Pengaruh dari gangguan antara tiga silinder menjadi rendah saat *spacing ratio* meningkat.

Penelitian yang dilakukan oleh Alam, dkk (2003) menunjukkan bahwa pada variasi sudut bodi pengganggu sebesar 30° didapatkan reduksi koefisien gaya *drag* yang terbesar dengan nilai Strouhal *number* terbesar dibandingkan dengan sudut bodi pengganggu lainnya, bahkan pada sudut 60° nilai koefisien gaya *drag* justru semakin meningkat. **Bantacut** (2014) juga menunjukkan hasil yang sama pada sudut bodi pengganggu 30° dapat mereduksi gaya *drag* dengan susunan *stagger*.

Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya, variasi yang dilakukan dengan menambahkan bodi penggangu di bagian *upstream* silinder utama dan sudut bodi pengganggu, diharapkan pada sudut bodi pengganggu 30° mendapatkan nilai reduksi koefisien gaya *drag* terbesar dibandingkan sudut pengganggu lainnya untuk susunan tiga buah silinder sirkular *equilateral-triangular*.

1.2 Rumusan Masalah

Inlet Disturbance Body (IDB) merupakan salah satu cara yang digunakan untuk mereduksi gaya hambat pada silinder sirkular. Penempatan *inlet disturbance body* dibagian *upstream* silinder sirkular tunggal telah banyak dilakukan oleh para peneliti sebelumnya, diantara lain Alam, dkk (2003) dan Diastian (2014). Aplikasi dalam dunia industri kebanyakan bukan silinder tunggal melainkan silinder berkelompok seperti susunan tandem, *side-by-side* dan *staggered*. Susunan silinder berkelompok ini juga telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya antara lain Tatsuno, dkk (1997), Annisa (2014), Bantacut (2014), Gu dan Sun (2000), dan masih banyak lainnya.

Interaksi antara *inlet disturbance body* dengan silinder utama dapat mempercepat proses transisi laminar ke turbulen sehingga mampu meningkatkan intensitas turbulensi dari *boundary layer* silinder utama. Jika boundary layer semakin turbulen, maka aliran akan lebih mampu melawan wall shear stress (τ_w) dan adverse pressure. Aliran yang mampu melawan adverse pressure akan membuat separasi lebih tertunda ke belakang. Hasil yang didapatkan oleh Gu dan Sun (2000) untuk tiga silinder sirkular yang disusun secara equilateral triangular tanpa penambahan bodi pengganggu menunjukkan bahwa nilai koefisien gaya hambat yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dengan silinder tunggal yang diberi *inlet disturbance body* pada bagian depan silinder.

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Gu dan Sun (2000) tentang silinder sirkular berkelompok yang mampu mereduksi gaya hambat lebih besar dibandingkan silinder tunggal yang diberi bodi pengganggu, penulis tertarik untuk melakukan penelitian dengan penambahan *inlet disturbance body* pada variasi sudut tertentu di bagian *upstream* masingmasing silinder sirkular yang disusun secara *equilateral triangular*. Harapannya dengan penambahan *inlet disturbance body* di setiap silinder akan lebih mampu mereduksi gaya hambat pada setiap silindernya dibandingkan dengan tiga silinder sirkular yang disusun secara *equilateral triangular* tanpa penambahan *inlet disturbance body* dan juga mendapatkan posisi sudut *inlet disturbance body* yang terbaik untuk reduksi gaya hambat terbesar pada setiap silinder utamanya.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas, maka tujuan dari penelitian ini antara lain:

- 1. Untuk menganalisa distribusi koefisien tekanan pada tiga silinder sirkular yang disusun secara *equilateral-triangular* dengan adanya penambahan bodi pengganggu.
- 2. Untuk mendapatkan posisi sudut dari bodi pengganggu yang menghasilkan gaya *drag* terkecil pada tiga silinder sirkular yang disusun secara *equilateral-triangular*.

3. Untuk menganalisa visualisasi profil kecepatan aliran dibelakang silinder yang disusun secara *equilateral-triangular* dengan penambahan dan variasi sudut bodi pengganggu.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini antara lain:

- 1. Memberikan gambaran secara kualitatif dan kuantitatif mengenai karakteristik aliran fluida melintasi silinder sirkular yang disusun secara *equilateral-triangular* dengan penambahan bodi pengganggu yang diletakkan pada bagian *upstream main cylinder*.
- 2. Memberikan pengetahuan dalam penggunaan *software* CFD untuk menyelesaikan permasalahan pada silinder sirkular khususnya yang tersusun secara *equilateral*.

1.5 Batasan Masalah

Pada penelitian ini perlu adanya batasan masalah sehingga pembahasan yang dilakukan lebih fokus pada tujuan yang telah ditentukan. Adapun batasan masalah dari penelitian ini antara lain:

- 1. Fluida kerja adalah udara dengan kondisi aliran *freestream* pada sisi inlet yang bersifat *steady* (pada penelitian eksperimen) dan *unsteady* (pada peneitian numerik), *incompressible*, dan *uniform*.
- 2. Benda uji berupa silinder sirkular dan enam buah batang pengganggu berbentuk silinder sirkular.
- 3. Tidak menganalisa fenomena perpindahan panas yang ditimbulkan oleh adanya gesekan aliran dengan benda uji maupun dengan dinding *wind tunnel*.
- Bilangan Reynolds yang digunakan untuk penelitian secara eksperimen dan numerik adalah 2.2 x 10⁴.
- 5. Pemodelan menggunakan simulasi numerik CFD komersial.

^{("}Halama<mark>n ini</mark> sengaj<mark>a di</mark>kosongk<mark>an</mark>"



BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Pada penelitian ini telah dilakukan beberapa kajian dengan mengambil beberapa sumber referensi. Adapun sumber referensi yang telah dikaji diambil dari berbagai sumber, antara lain buku teks, tesis, disertasi dan berbagai jurnaljurnal yang berkaitan dengan penelitian ini yaitu aliran yang melintasi silinder sirkular.

2.1 Konsep Boundary Layer

Konsep lapisan batas pertama kali dikemukakan pada tahun 1904 oleh Ludwig Prandtl, seorang ahli aerodinamika Jerman. Pada gambar 2.1 menjelaskan suatu lapis batas akan terbentuk ketika aliran fluida melintasi suatu kontur permukaan. Lapis batas ini terbentuk karena adanya gesekan yang terjadi antara permukaan padat dengan fluida. Gesekan paling besar tentunya adalah ketika dekat dengan permukaan benda yang menyebabkan kecepatan fluida sesaat menjadi nol. Semakin menjauh dari permukaan benda padat pengaruh gaya gesek ini juga akan semakin berkurang hingga batas dimana pengaruh gaya gesek ini sudah tidak ada. Daerah yang sudah tidak terpengaruh oleh gaya gesek ini disebut daerah *freestream*. Antara daerah *freestream* dengan permukaan benda akan terbentuk profil kecepatan akibat adanya gaya gesek. Batas yang memisahkan antara daerah *freestream* dengan daerah yang masih dipengaruhi gaya gesek itulah yang dinamakan *boundary layer edge*.



Gambar 2.1 Skema boundary layer (Fox dkk, 2010: 392)

2.2 Aliran Viscous dan Inviscid

Perbedaan utama dari aliran viscous dan inviscid yaitu apabila pada aliran inviscid nilai dari koefisien viskositas diasumsikan nol (μ =0) walaupun sebenarnya fluida dengan viskositas nol tidak pernah dijumpai. Sebaliknya aliran viscous adalah aliran fluida yang memiliki viskositas yang ditandai dengan munculnya efek gesekan yang signifikan. Aliran tersebut biasanya dekat dengan permukaan yang padat.



Gambar 2.2 Aliran fluida melalui silinder sirkular (Fox, dkk, 2010: 39)

Pada gambar 2.2 (a), terlihat garis aliran yang simetris dari depan ke belakang silinder. Hal ini dikarenakan aliran massa yang konstan, di mana pun aliran yang membuka, kecepatan harus menurun, dan sebaliknya. Dengan begitu, maka kita dapat melihat bahwa kecepatan di sekitar titik A dan C harus relatif rendah; sedangkan pada titik B akan tinggi, titik A dan C adalah stagnasi poin. Titik A dan C memiliki tekanan yang relatif besar (dan sama); sedangkan titik B akan menjadi titik tekanan rendah. Bahkan, distribusi tekanan pada silinder adalah simetris dari depan ke belakang, dan tidak ada hambatan gaya total akibat tekanan. Karena diasumsikan aliran inviscid, maka koefisien viskositas diasumsikan nol (μ =0).

Untuk gambar 2.2 (b), titik A adalah titik stagnasi dimana aliran melewati sebuah silinder sirkular dan selanjutnya terbentuk *boundary layer*. Dari titik A ke titik B terjadi kenaikan kecepatan yang mengakibatkan penurunan tekanan dan selanjutnya dari titik B ke titik D terjadi penurunan kecepatan dan terjadi kenaikan tekanan dari titik B ke titik D. Pada titik D momentum aliran tidak cukup melawan *adverse pressure gradient* dan tegangan geser, titik ini disebut titik separasi. Daerah antara kedua titik separasi disebut daerah *wake*. Semakin besar daerah *wake* yang terbentuk maka semakin besar pula perbedaan tekanan di depan silinder dan di belakang silinder yang mengakibatkan semakin besar gaya *drag* yang terjadi. Oleh karena itu harus dilakukan upaya untuk menunda terjadinya titik separasi sehingga daerah *wake* yang terbentuk akan semakin kecil yang berarti mengurangi gaya *drag* yang terjadi.

2.3 Pengaruh Bodi Pengganggu Terhadap Reduksi Gaya *Drag* pada Silinder

Pengaruh penambahan bodi pengganggu terhadap reduksi gaya *drag* telah dilakukan oleh **Alam, dkk (2003).** Bodi pengganggu yang digunakan pada penelitian ini berupa silinder sirkular yang ditempatkan di depan silinder utama. Adapun diameter silinder utama yang digunakan sebesar 49 mm, sedangkan diameter bodi pengganggu sebesar 4, 5, dan 6 mm. **Alam, dkk** melakukan variasi terhadap sudut bodi pengganggu (α) mulai dari 20° hingga 60°. Sedangkan gap (δ) yang digunakan dalam penelitian adalah 0.4 - 12 mm dengan bilangan *Reynolds* sebesar 5.5×10⁵. Untuk gambaran pengujian yang dilakukan dapat dilihat pada gambar 2.3 dibawah ini:



Gambar 2.3 Variasi sudut bodi silinder sirkular pengganggu terhadap silinder utama (Alam, dkk, 2003)



Gambar 2.4 Pengaruh *angular position* (α) terhadap koefisien *drag* dan (b) Strouhal *number*, Δ : d/D = 0.08 (d = 4 mm); •: d/D = 0.10 (d = 5 mm); \Box : d/D = 0.12 (d = 6 mm) (Alam, dkk, 2003)

Pada gambar 2.4 menunjukkan perbandingan nilai koefisien *drag* dan Strouhal *number* yang dipengaruhi oleh *angular position* bodi pengganggu. Pada sudut bodi pengganggu 30°, reduksi koefisien *drag* pada silinder paling tinggi, sedangkan untuk nilai *Strouhal number* tertinggi. Hal ini menunjukkan bahwa pada posisi sudut 30° terjadi reduksi yang terbesar dibandingkan variasi sudut bodi pengganggu lainnya.

2.4 Pengaruh Variasi Bodi Pengganggu terhadap Visualisasi Profil Kecepatan

Annisa (2014) melakukan penelitian secara eksperimen dan numerik untuk mengetahui pengaruh *inlet disturbance body* terhadap karakteristik aliran melintasi dua silinder sirkular yang tersusun secara tandem pada saluran sempit. Benda uji yang digunakan berupa dua silinder sirkular berdiameter (D) 25 mm yang disusun secara tandem. Variasi pada penelitian ini meliputi jarak antar silinder dan sudut bodi pengganggu (α) 30⁰ dan 60⁰.





Gambar 2.5 Grafik distribusi tekanan silinder (a) *upstream*, (b) *downstream* pada konfigurasi tandem dengan IDB 30° ; <u>L</u>/D 4; *L*/D 2.5; <u>L</u>/D 4;

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Annisa ditunjukkan pada gambar 2.5 Titik stagnasi pada koefisien tekanan silinder *upstream* pada konfigurasi tandem dengan *IDB* 30° (gambar 2.5 a) tepat pada sudut 0°, setelah titik stagnasi aliran mengalami percepatan yang tidak terlalu signifikan. Hal ini disebabkan adanya celah antara *IDB* dan permukaan silinder, sehingga aliran mengalami hambatan. Sedangkan untuk distribusi koefisien tekanan pada kontur permukaan silinder *downstream* untuk susunan silinder tandem dengan *IDB* 30° (gambar 2.5 b) bernilai negatif untuk variasi jarak antar silinder $1.5 \le L/D \le 3.5$. Hal ini menunjukkan bahwa silinder *downstream* masih terlingkupi *wake* silinder *upstream*. Adanya *peak* pada grafik menandakan bahwa *shear layer* yang terpisah dari silinder *upstream* mengalami *re-attachment* pada permukaan silinder *downstream*.





Gambar 2.6 *Velocity pathline* susunan silinder secara tandem dengan IDB 30° (a) dan 60° (b) pada L/D = 2

Detail A (gambar 2.6 a) menunjukkan adanya aliran yang terperangkap. Setelah melewati celah, aliran terseparasi namun akibat adanya *wake* dari *IDB*, *shear layer* yang terlepas mengalami *re-attach* ke permukaan silinder *upstream*. Sedangkan untuk silinder *downstream* terdapat 2 titik *re-attachment* (Ra). Setelah mengalami *re-attachment* aliran terbagi menjadi *forward shear layer* yang kemudian terseparasi pada sisi depan silinder (*FSp*) dan *backward shear layer* yang terseparasi pada sisi belakang silinder (*BSp*).

Sedangkan pada gambar 2.6 (b), fenomena yang terjadi pada silinder *upstream* hampir sama seperti gambar 2.6 (a) yaitu stagnasi terletak pada sudut 0°. Perbedaan terlihat pada detail B (gambar 2.6 (b)) dan letak titik separasi (Sp) yang lebih cepat. Pada gambar 2.6 (b) terlihat bahwa setelah melewati sisi celah, *shear layer* langsung terseparasi dan tidak mengalami *reattachment* pada kontur

permukaan silinder *upstream*. Hal ini disebabkan *shear layer* yang terseparasi terlalu lebar, sehingga *wake* dari *IDB* tidak mampu mendorong *shear layer* kembali ke permukaan silinder. Sedangkan untuk silinder *downstream* mengalami dua titik *re-attachment* (*Ra*). Hal ini menunjukkan bahwa penambahan *IDB* pada sudut 60 mengakibatkan *wake* silinder *upstream* yang terjadi lebih lebar daripada konfigurasi tandem yang lain sehingga interaksi aliran silinder *upstream* terhadap silinder *downstream* masih kuat.

2.5 Pengaruh Penggunaan *Inlet Disturbance Body* (IDB) Terhadap Reduksi Gaya Hambat Pada Tiga Silinder Sirkular Dengan Susunan Stagger

Bantacut (2014) melakukan penelitian secara eksperimen tentang penambahan bodi pengganggu untuk mengurangi gaya drag pada tiga silinder yang disusun *stagger*. Jarak antar silinder tetap (L/D = 2) dengan sudut pengganggu divariasikan yaitu 30° dan 60°. Gambar 2.7 merupakan geometri pada penelitian ini.



Fluid Flow

Gambar 2.7 Geometri Penelitian (Bantacut, 2014)





Gambar 2.8 Grafik distribusi koefisien drag pressure (C_{Dp}) pada konfigurasi stagger: (a) Tanpa IDB; (b) dengan IDB 30°;
(c) dengan IDB 60° untuk berbagai variasi jarak transversal (*T/D*)

Distribusi koefisien *pressure drag* untuk silinder 1 pada konfigurasi *stagger* tanpa IDB, memiliki nilai terendah dibandingkan dengan silinder 2 dan silinder 3 seperti ditunjukkan pada (gambar 2.8 a), hal ini terjadi pada semua variasi jarak transversal antar silinder (T/D). Sedangkan distribusi koefisien *pressure drag* pada konfigurasi *stagger* dengan IDB 30° memiliki kesamaan dengan C_{DP} tanpa IDB, nilai C_{DP} terendah tetap berada pada silinder 1 untuk semua variasi jarak transversal (T/D)= 1,5 s/d 4, dibandingkan dengan silinder 2 dan silinder 3 seperti ditunjukkan pada (gambar 2.8 b), dan C_{DP} pada konfigurasi ini lebih rendah dibandingkan dengan konfigurasi yang lain, hal ini disebabkan karena momentum aliran yang terseparasi dan pengaruh *wake* dari IDB pada sudut 30° yang kembali *re-acctach* ke kontur permukaan silinder 1, memiliki kandungan energi yang lebih tinggi sehingga mampu melawan *adverse pressure* yang menyebabkan terjadinya reduksi gaya *drag* pada silinder 1.

Untuk distribusi koefisien *pressure drag* pada konfigurasi *stagger* dengan IDB 60° (gambar 2.8 c) nilai C_{DP} nya berbanding terbalik dengan konfigurasi stagger tanpa IDB maupun konfigurasi stagger dengan IDB 30°, perbedaan paling mencolok

terjadi pada silinder 1 untuk semua variasi jarak (T/D), yaitu silinder 1 memiliki nilai C_{DP} tertinggi dibandingkan dengan silinder 2 dan silinder 3, Sedangkan distribusi C_{DP} terendah berada pada silinder 3 untuk semua variasi jarak transversal (T/D), dan untuk silinder 2 distribusi C_{DP} nya berada diatas silinder 3 untuk semua variasi jarak transversal (T/D). Hal ini mengindikasikan bahwa aliran yang melintasi 3 silinder sirkular konfigurasi stagger dengan IDB 60° dapat mereduksi koefisien *pressure drag* silinder *downstream* akan tetapi untuk silinder *upstream* terjadi peningkatan C_{DP} .

2.6 Karakteristik Aliran pada Tiga Silinder Sirkular yang Disusun Secara Equilateral-triangular

Igarashi dan Suzuki (1984), meneliti karakteristik aliran di sekitar tiga silinder yang disusun *in-line*. Untuk susunan *triangular cluster*, Price dan Paidoussis (1984), mengukur gaya aerodinamik pada silinder ketiga baik *downstream* dan *upstream* dari silinder yang susunannya *side by side* dari awalnya simetris ke susunan *stagger*.

Untuk kasus tiga silinder yang disusun secara *equidistant triangular cluster*, **Zdravkovich (1968)** menggunakan teknik visualisasi asap, mempelajari hubungan yang komplek dari jalannya *vortex* untuk bilangan Reynolds antara 300 dan 600. Penelitian lainnya dilakukan oleh **Sayers (1987)** dengan bilangan Reynolds 3 x 10⁴ dengan variasi *spacing ratio* antara 1.25 dan 5 dengan variasi *incidence angle* juga diukur. Hasil yang diperoleh mengindikasikan bahwa koefisien gaya sangat kuat dipengaruhi oleh *incidence angle* oleh susunan *triangular cluster*. Pembalikan besar di besar dan arah *lift* ditemukan pada bagian *downstream* silinder antara 120° dan 165°, sementara *drag* minimum ditemukan pada 150°. Ini sesuai dengan $\alpha = 0°$ hingga 45° dan 30° dari hasil penelitian.

Pengaruh shear layer reattachment dan wake pada tiga silinder sirkular yang disusun secara equilateral-triangular telah dilakukan oleh **Gu dan Sun** (2000). Penelitian ini melakukan variasi spacing ratio yaitu $1.7 \le N/d \le 5.0$, dimana N adalah jarak antara pusat silinder yang saling berdekatan, dan *d* merupakan diameter dari silinder. Untuk mendapatkan distribusi tekanan pada tiga silinder sirkular menggunakan bilangan Reynolds 5.5 x 10^4 , dan untuk visualisasi aliran menggunakan bilangan Reynolds sebesar 1.4 x 10^4 . Adapun konfigurasi dari tiga silinder sirkular pada penelitian ini seperti gambar 2.9 dibawah ini:



Gam<mark>bar</mark> 2.9 Konfigurasi tiga silinder dalam satu grup (Gu dan Sun, 2000)

Penelitian ini dilakukan menggunakan *closed-return low-speed wind tunnel* dengan ukuran *test section* lebar 1.2 m, tinggi 1 m dan panjang 8 m. Variasi sepanjang *test section* \pm 1% dan intensitas turbulensi sebesar 4%. Untuk kecepatan maksimum sebesar 36 m/s. Masing-masing silinder memiliki panjang *tube* sebesar 640 mm dengan diameter luar 48 mm. *pressure taps* setiap 10° pada *mid-span* dari keliling silinder.

Untuk melihat pengaruh dari pengukuran tekanan pada penelitian ini, distribusi tekanan masing-masing silinder pertama-tama diukur dan kemudian dibandingkan dengan hasil dari penelitian tiga silinder. Berikut ini gambar 2.10 adalah hasil waktu rata-rata dan distribusi tekanan pada bilang Reynolds 5.5×10^4 .





Gambar 2.10 *Time-mean Pressure Distribution* pada: (a) Satu Silinder dan (b) Tiga Silinder dengan N/d = 1.7 pada Re = 5.5×10^4 (Gu dan Sun, 2000)

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan Gu dan Sun, dengan adanya variasi *spacing ratio*, didapatkan tekanan pada masing-masing silinder sangat mempengaruhi terbentuknya *shear layer* dan *wake* di bagian silinder. Pola aliran yang terjadi karena silinder yang berdekatan akan mengakibatkan *reattachment* pada *shear layer* dan *wake*.

2.7 Pengaruh Intensitas Turbulensi pada Sisi *Free Stream* Terhadap Reduksi Gaya *Drag*

Niemann dan Holscher (1990) melakukan penelitian mengenai interaksi antara aliran fluida dengan silinder sirkular. Interaksi antara aliran fluida dengan geometri berbentuk *bluff body* maupun *streamlined body*, dimana aliran fluida akan bertransisi dari aliran laminar menjadi turbulen hingga terjadi fenomena separasi aliran. Terjadinya transisi lapis batas tersebut dipengaruhi oleh kecepatan pada *free-stream* dan profil alirannya, *free-stream turbulence* (intensitas turbulensi), bentuk benda (geometri maupun orientasi terhadap arah alirannya), dan kekasaran permukaan suatu benda. Geometri dari *bluff body* ketika dilingkupi oleh aliran fluida, pada umumnya mempunyai karakteristik yang menghasilkan *adverse pressure gradient* yang lebih dominan dibandingkan *wall shear stress*nya. Fenomena ini dapat mempengaruhi terbentuknya separasi *bubble* maupun letak separasi masif dari momentum fluida yang *attach* pada kontur permukaan padat. Momentum fluida yang telah terseparasi dari kontur permukaan padat menghasilkan defisit momentum pada daerah *downstream bluff body* tersebut. Defisit momentum pada daerah *downstream bluff body* dikenal sebagai *wake*. Semakin lebar *wake* yang ditimbulkan oleh *bluff body* yang dialiri oleh fluida, semakin besar pula gaya hambat (*drag force*) yang ditimbulkannya. Gaya hambat pada *bluff body* merupakan penjumlahan dari *pressure drag* dan *skin friction drag*.

Sedangkan **Bearman dan Morel** (**1983**) melakukan penelitian tentang intensitas turbulensi terhadap nilai dari koefisien drag (C_D). Konfigurasi yang digunakan adalah sebuah silinder sirkular diuji pada bilangan Reynolds $4x10^4$ hingga $3x10^5$. Hasil penelitian dapat dilihat dari gambar 2.11 berikut ini:



Gambar 2.11 Pengaruh intensitas turbulensi terhadap *coefficient of drag* (*Cp*) pada silinder sirkular, (Bearman dan Morel 1983)

Berdasarkan gambar 2.11 terlihat bahwa nilai koefisien $drag C_D$ menurun seiring dengan meningkatnya intensitas turbulensi pada bilangan Reynolds yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa jika intensitas turbulensi meningkat dan koefisien drag menurun, maka titik separasi bisa lebih tertunda sehingga *wake* yang dihasilkan menjadi lebih kecil.



"Halaman ini sengaja dikosongkan"



BAB 3 METODE PENELITIAN

Dalam pelaksanaan penelitian ini, ada beberapa tahapan yang harus dijalani untuk mendapatkan data dan hasil yang diinginkan. Adapun pengambilan data dalam penelitian ini ada dua metode, yaitu pengukuran secara langsung dan tidak langsung. Untuk pengukuran secara langsung, data yang diperoleh dari proses eksperimen dibaca secara langsung, sedangkan pengukuran tak langsung yaitu data yang diperoleh memerlukan proses lebih lanjut untuk mendapatkan hasil pengukuran yang diinginkan. Adapun tahapan-tahapan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.1 Eksperimen

3.1.1 Desain Eksperimen

Benda uji berupa tiga silinder sirkular yang disusun secara *equilateral-triangular* dengan diameter D = 25 mm dimana akan ditambahkan dua buah bodi pengganggu berupa silinder sirkular dibagian *upstream* pada masing-masing silinder. *Wall-pressure tap* diletakkan pada sisi *upstream* dan *downstream test section* untuk mendapatkan selisih tekanan yang terjadi. *Wall-pressure tap* pada sisi *upstream* berjarak 150 mm dari sumbu silinder utama, sedangkan pada sisi *downstream* berjarak 4D dari sumbu silinder *upstream*. Bilangan *Reynolds* yang digunakan 2.2 x10⁴. Untuk variasi yang digunaka pada penelitian ini adalah variasi sudut pengganggu antara lain: 20⁰, 30⁰, 40⁰ dan 60⁰ pada jarak antar silinder utama (S/D) yaitu 2. Gambar 3.1 menunjukkan skema penelitian, yaitu susunan tiga buah silinder sirkular yang disusun secara *equilateral-triangular* dengan penambahan *inlet disturbance body* yang divariasikan.





Gambar 3.1 Instalasi penelitian (a) tampak samping, (b) detail instalasi silinder sirkular

Keterangan gambar 3.1:

- D = Diameter silinder
- d = diameter IDB
- θ = sudut IDB
- S = jarak center to center antar silinder utama (susunan staggered)
- a = tinggi *center* IDB dengan *center* silinder utama
- b = jarak *center to center* antara IDB dengan silinder utama
- g = gap antara IDB dengan silinder utama
Dalam penelitian ini, nilai *blockage ratio* terbesar terdapat pada variasi sudut IDB (θ) = 60° sebesar 26%. Adapun perhitungan nilai *blockage ratio* yaitu:

Blockage Ratio = $\frac{d}{h} \times 100\%$

dimana, d = diameter benda uji selebar test section

h = lebar test section $Blockage ratio = \frac{50 mm + (2 x 10 mm) + (2 x 4 mm)}{300 mm} x 100 \%$

= 26%

dimana,

50 mm = nilai jarak antar silinder utama bagian *downstream* 2 x 10 mm = nilai jari-jari untuk silinder 2 dan silinder 3 2 x 4 mm = nilai diameter silinder IDB 300 mm = nilai h

3.1.2. Peralatan Benda Uji

1. Silinder Sirkular

Pada penelitian ini silinder utama yang digunakan sebanyak tiga buah, dengan spesifikasi dari geometri masing-masing silinder upstream dan downstream yaitu:

- Diameter = 25 mm
- Panjang = 300 mm
 - *Pressure tap* = 4 lubang
 - Bahan = Pipa PVC

Detail gambar dapat dilihat pada lampiran gambar 1.

2. Bodi Pengganggu

- Tipe = Polos
- Panjang = 300 mm
- Diameter
- = 4 mm

Detail gambar dapat dilihat pada lampiran gambar 2.

3. Wind Tunnel (Terowongan Angin)

Penelitian ini menggunakan wind tunnel jenis open circuit wind tunnel, dimana udara yang dialirkan dalam wind tunnel langsung dilepas ke udara bebas setelah melalui work section. Wind tunnel ini bisa digolongkan sebagai wind tunnel subsonic.

- Spesifikasi Wind Tunnel :
 - Jenis

: Subsonic, open circuit wind

- Bentuk saluran uji
- Panjang
- Tinggi
- Lebar

tunnel

: Penampang heksagonal

- : 600 mm
- : 300 mm
- : 300 mm

Detail gambar dapat dilihat pada lampiran gambar 3.

3.1.3. Alat Ukur

Pada penelitian ini, dilakukan pengambilan data berupa tekanan statis dan tekanan stagnasi dengan menggunakan *wall pressure tap, pitot static tube, tranducer* tekanan, dan data akuisisi.

A. Wall-pressure tap

Wall-pressure tap yaitu lubang-lubang kecil berdiameter 1 mm yang terhubung pada manometer atau *tranducer* tekanan serta dipasang sepanjang kontur permukaan benda uji maupun saluran *wind tunnel* yang searah aliran dan tegak lurus terhadap permukaan.

B. Pitot Tube 📝

Alat ini berfungsi untuk mengukur besarnya tekanan statis dan tekanan stagnasi aliran di antara dan di belakang benda uji. Detail gambar dapat dilihat pada lampiran gambar 4.

C. Transducer Tekanan dan Data Akuisisi

Tranducer tekanan dan data akuisisi merupakan alat yang digunakan untuk mengukur tekanan secara digital sehingga hasil yang didapatkan lebih presisi. Detail gambar dapat dilihat pada lampiran gambar 5.

D. Inclined Manometer

Alat ini berfungsi untuk mengukur tekanan yang diukur dengan *pressure tap* dan *pitot static tube*. Bentuk *inclined manometer* adalah V dengan sudut kemiringan 15^0 untuk membaca Δh yang terukur.

| • | Skala | : 1 mm |
|---|-------|--------|
| | | |

- Fluida kerja
- : Red oil
- Toleransi $\pm 0.5 \text{ mm}$
- Specific gravity red oil : 0.827

Detail gambar dapat dilihat pada lampiran gambar 6.

E. Humidity dan Temperature Meter

Alat yang digunakan untuk mengukur kelembaban dan temperatur fluida kerja agar data yang didapatkan akurat.

F. Filler Gauge

Digunakan untuk mengukur celah antara silinder sirkular utama dengan batang pengganggu agar jaraknya tetap saat dipindahkan posisi sudutnya.

G. Inverter

Inverter adalah alat yang digunakan untuk mengatur kecepatan putaran *blower*, ada pun spesifikasi dari inverter seperti pada tabel 3.1 berikut ini:

| Jenis Atribut | Nilai Atribut |
|----------------------|---|
| Current Rating | 4.8 A |
| Series | FVR - G5 |
| Туре | Inverter Auto-Drive |
| Voltage | $220 \rightarrow 240 \text{V} \text{ ac}$ |
| Power Rating | 1.5 kW/2 HP |
| Dimensions H x W x D | 390 x 235 x 235 mm |
| Number of Phases | |

Tabel 3.1. Spesifikasi Inverter

Detail gambar dapat dilihat pada lampiran gambar 7.

3.1.4. Prosedur Penelitian Eksperimen

Prosedur penelitian adalah tahapan yang paling penting dalam penelitian ini, karena untuk mendapatkan data-data kuantitatif yang nantinya akan diolah dan dianalisa dalam bentuk grafik. Langkah-langkah yang dilakukan dalam proses penelitian ini ini sebagai berikut:

3.1.4.1 Kalibrasi *Tranducer* Tekanan dan Data Aquisi

Adapun peralatan yang dipergunakan pada proses kalibrasi ini adalah

sebagai berikut:

- Manometer V
- Data Akuisisi DAQ PRO 5300
- **Pressure tranducer**
- Pitot static tube

3.1.4.2 Tahapan Kalibrasi

Sebelum melakukan pengambilan data maka ada beberapa tahapan kalibrasi yang dilalui yaitu:

a. Kalibrasi tekanan dinamik

- 1. Memasang instalasi untuk keadaan free stream tanpa benda uji.
- 2. Memasang *pitot static tube* pada dinding kemudian disambungkan pada manometer serta *tranducer*.
- Mengatur inverter dari 0 42 Hz dengan interval 4 Hz, yakni 0, 18, 22, 26, 30, 34, 38, 42 Hz.
- 4. Mengambil data tekanan dinamik yang didapatkan dari manometer dan pressure tranducer.
- 5. Mengambil data Δh (mm) didapatkan dari manometer dan arus (mA) didapatkan dari data akuisisi.
- 6. Data-data yang telah diperoleh tersebut dijadikan grafik hubungan antara Δ h manometer dengan arus (i).

Berikut hasil yang diperoleh dalam validasi tekanan dinamik seperti pada grafik 3.1 berikut:



Gambar 3.2 Grafik Kalibrasi hubungan bacaan manometer dengan arus *pressure tranducer*

b. Kalibrasi tekanan pada dinding

Prosedur yang dilakukan untuk kalibrasi tekanan:

- 1. Memasang instalasi untuk keadaan *free stream* tanpa benda uji.
- Wall-pressure tap disetiap sisi test section disatukan kemudian disambungkan ke manometer serta tranducer. Data yang diperoleh merupakan tekanan rata-rata dari 4 sisi test section.
- 3. Mengatur inverter dari 0 42 Hz.
- 4. Mengambil data untuk tekanan statis dari *manometer dan pressure tranducer*.
- 5. Mengambil data untuk $\Delta h \ (mm)$ dari manometer dan arus (mA) dari data akuisisi.
- 6. Data-data yang telah diperoleh dijadikan grafik hubungan antara Δh dengan arus (i).

c. Pengambilan Data

Langkah-langkah dalam proses pengambilan data adalah sebagai berikut:
Menata peralatan dan memasang benda uji yang digunakan untuk penelitian.

- Mengukur temperatur udara di dalam ruangan saat pengujian (temperatur, dan tekanan).
- 3. Mengatur benda uji pada saluran *wind tunnel*, yaitu tiga buah silinder sirkular berdiameter D = 25 mm yang disusun secara *euqilateral triangular* dengan jarak S/D 2, kemudian bodi pengganggu dengan sisi (s) = 4 mm yang di letakkan pada sudut 20°, 30°, 40° dan 60° pada bagian *upstream* dari masing-masing silinder.
- 4. Mengukur kesejajaran silinder dan dinding dengan water pass.
- Menghidupkan wind tunnel dan mengatur kecepatan secara perlahan agar mencapai kondisi steady.
- 6. Mengkur tekanan stagnasi dan tekanan statis dibagian tengah saluran uji yang terjadi pada *wall pressure tap inlet* dan *outlet* pada Re= 2.2×10^4 .
- 7. Mengukur tekanan disepanjang kontur permukaan silinder yang telah dipasang *pressure tap* dengan memutar silinder dari sudut 0⁰ hingga 180⁰ dengan interval 5⁰.
 - Mengukur profil kecepatan di belakang *downstream* silinder utama berjarak 4D dari *centerline* silinder. Pengambilan data ini dimulai dari tepi *upper wall* saluran uji hingga bagian *lower* dengan jarak pengambilan data setiap 5 mm. Pengukuran ini dilakukan untuk mendapatkan pola *wake* yang terbentuk dengan menggunakan *pitot static tube*.

3.1.5. Analisa Grup Tak Berdimensi Untuk Koefisien Tekanan Pada Silinder

Distribusi tekanan pada silinder dipengaruhi oleh beberapa parameter, sehingga perbedaan tekanan dapat dituliskan sebagai fungsi dari parameter– parameter tersebut. Secara matematik dapat dituliskan sebagai berikut:

- Parameter fluida
 - ρ, μ,

8.

2.

Parameter Geometri benda a, b, d, D, g, S

 $\Delta P = f(\rho, \mu, \overline{V}, a, b, d, D, g, S)$

Adapun parameter yang berpengaruh dalam penelitian ini dirincikan dalam tabel 3.2.

| No. | Variabel | Unit | Dimensi |
|-----|---|-----------|--------------|
| A | $\Delta P =$ Perbedaan Tekanan | N/m^2 | $M.L^{-2}$ |
| 2. | $\rho = Massa jenis udara$ | Kg/m^3 | $M.L^{-3}$ |
| 3. | $\mu = \text{Viskositas absolut udara}$ | $N.s/m^2$ | $M.L^{-2}.T$ |
| 4. | \overline{V} = Kecepatan aliran | m/s^2 | $L.T^{-2}$ |
| 5. | g = Jarak antara silinder utama dengan bodi pengganggu | m | |
| 6. | D = Diameter silinder sirkular | m | |
| 7. | <i>d</i> = Diameter bodi pengganggu | m | L |
| 8. | S = Jarak antara silinder upstream dengan silinder downstream | m | |
| 9. | b = Jarak <i>center to center</i> antara inlet bodi pengganggu dengan silinder utama | m | L |
| 10. | a = Tinggi <i>center to center</i> antara inlet bodi pengganggu dengan silinder utama. | m | |

Tabel 3.2. Parameter yang berpengaruh

dimana:

- NAG

 ΔP = Perbedaan Tekanan (N/m²)

Dengan menggunakan Buckingham π -theorema dengan parameter berulang, ρ , V dan D, diperoleh 7 grup tak berdimensi yaitu:

1. $\pi_1 = \frac{\Delta P}{\rho V^2}$ (koefisien tekanan) 2. $\pi_2 = \frac{\mu}{\rho V D}$ (bilangan Reynolds)

```
utama)
```

(perbandingan tinggi *center to center* antara bodi pengganggu dengan diameter silinder

(perbandingan jarak *center to center* antara *inlet* bodi pengganggu dengan diameter silinder utama)

(perbandingan jarak bodi pengganggu dengan pusat silinder sirkular)

(perbandingan tinggi bodi pengganggu dengan pusat silinder sirkular)

(perbandingan jarak antar titik pusat silinder utama terhadap diameter silinder utama)

$$8.\pi_8 = \frac{\pi_3}{\pi_4} = \frac{\frac{a}{D}}{\frac{b}{D}} = \frac{a}{b} = \theta$$

6.

7.

(perbandingan jarak bodi pengganggu dengan tinggi bodi pengganggu sehingga didapatkan sudut pengganggu (θ))

Hubungan antar grup tak berdimensi adalah sebagai berikut:

•
$$\pi_1 = f_1(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8)$$

•
$$\frac{\Delta P}{\rho V^2} = f_1(\frac{\mu}{\rho V D}, \frac{a}{D}, \frac{b}{D}, \frac{g}{D}, \frac{d}{D}, \frac{s}{D})$$

Karena nilai sudut pengganggu didapatkan dari nilai π_3 dan π_4 , maka fungsi bilangan tak berdimensi menjadi:

$$\frac{\Delta P}{\rho V^2} = f_2(\frac{\mu}{\rho V D}, \theta, \frac{g}{D}, \frac{d}{D}, \frac{S}{D})$$

 $\frac{\Delta P}{\alpha V^2} = f_3(\theta, \frac{S}{D})$

Pada penelitian ini, $\frac{\mu}{\rho v D}$, $\frac{g}{D}$, $\frac{d}{D}$ ditentukan konstan, sedangkan sudut posisi dari bodi pengganggu (θ) di variasikan, untuk melihat perbandingan reduksi gaya hambat yang terjadi diantara variasi tersebut, sehingga diperoleh: Sehingga nilai koefisien *pressure* (C_P) pada silinder utama adalah:

$$_{P} = \frac{\Delta P}{\rho V^{2}} = f_{3}(\theta, \frac{S}{D})$$

3.1.6. Hasil Percobaan dan Analisis Data:

С

- a. Dari hasil pengukuran diperoleh data sebagai berikut:
 - Perbedaan tekanan pada saluran sisi inlet dan outlet dari main silinder utama.
 - 2. Distribusi tekanan pada tiap silinder
- b. Pengolahan data hasil pengukuran

Dari hasil pengukuran selanjutnya akan diolah untuk menjelaskan berbagai fenomena fisis baik berupa data kuantitatif yaitu Cp, C_{DP} maupun data kualitatif yaitu letak separasi massif, separasi *bubble, wake region*, dan *vortex*. Berikut ini merupakan metode perhitungan untuk mendapatkan nilai koefisien tekanan (Cp) dan koefisien *pressure drag* (C_{DP}). Namun, sebelum melalui serangkaian tahapan tersebut, kita akan menghitung tekanan statis dan tekanan stagnasinya.

Tekanan statis adalah tekanan yang diukur melalui suatu instrumen atau alat yang bergerak bersama aliran dengan kecepatan relatif alat ukur terhadap aliran adalah nol. Pengukuran tekanan statis menggunakan *wall pressure tap*, karena mengingat bahwa tidak ada fluida ideal (*nonviscous*) di permukaan bumi ini sehingga kecepatan aliran fluida pada permukaan dinding akan menjadi nol.

Tekanan stagnasi (tekanan total) adalah tekanan yang diukur pada daerah dimana aliran fluida diperlambat hingga nol dengan proses perlambatan tanpa gesekan. Persamaan Bernoulli dapat diterapkan pada aliran *incompressible* untuk sepanjang suatu *streamline*, yang dapat ditulis

sebagai berikut:

 $\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = C$

1. Pengukuran tekanan stagnasi (P_o) dimana kecepatannya (V_o) adalah nol dan $z_o = z$ maka persamaan Bernoulli di atas menjadi:

$$\frac{p_o}{\rho} + \frac{V_o^2}{2} + gz = \text{konstan}$$
$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} = \text{konstan}$$

(3.1)

(3.3)

(3.4)

(3.5)

Tekanan dinamis merupakan selisih antara tekanan stagnasi dengan tekanan statis.

$$\frac{1}{2} \cdot \rho V^2 = p_o - p$$
(3.2)

3. Perhitungan koefisien tekanan (Cp), didapatkan dari hasil selisih antara tekanan lokal dengan tekanan aliran bebas dibagi dengan tekanan dinamis.

$$C_p = \frac{p - p_{\infty}}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2}$$

4. Perhitungan koefisien drag pressure (C_{DP})

 $C_{\rm D} = \frac{F_{\rm D}}{\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2 A}$

Koefisien drag dibagi menjadi dua, yaitu:

a. Pressure drag, dimana nilainya diperoleh dari adanya pengaruh pressure

b. Skin friction drag, dimana nilainya diperoleh berdasarkan wall shear stress.

Namun untuk penelitian kali ini skin friction drag tidak diteliti.

Perhitungan koefisien *pressure drag* (C_{DP}) didapatkan dari nilai distribusi tekanan (C_P) dari hasil pengintegrasian koefisien tekanan kontur permukaan silinder (C_P).

$$C_{\rm Dp} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} Cp(\theta) \cos(\theta) d\theta$$

Sedangkan untuk mendapatkan harga koefisien *pressure drag* (C_{DP}) dapat diselesaikan dengan metoda numerik *aturan Simpson 1/3 segmen berganda* yang dirumuskan pada persamaan (3.6) berikut:

$$I \cong (b-a) \frac{f(x_0) + 4\sum_{i=1,3,5}^{n-1} f(x_i) + 2\sum_{j=2,4,6}^{n-2} f(x_j) + f(x_n)}{3n}$$
(3.6)

Dimana:

- $b = 2\pi \operatorname{dan} a = 0, f(x0) = Cp(0) \cos(0) \operatorname{dan} f(xn) = Cp(2\pi) \cos(2\pi)$ untuk menyelesaikan persamaan (3.2).
- $b = h \operatorname{dan} a = 0, f(x0) = u(y0) \operatorname{dan} f(xn) = u(yn)$ untuk menyelesaikan persamaan (3.3).
- f(xi) adalah perkalian dari fungsi data gasal dimana i = 1,3,5 ...n-1.
- > f(xj) adalah perkalian dari fungsi data genap dimana j = 2,4,6n-2.
- n = jumlah data

3.2 Simulasi Numerik dengan Fluent 6.3.26

3.2.1 Pre Processing

Tahap *pre processing* merupakan tahap awal untuk menganalisa pemodelan CFD. Tahap ini terdiri dari pembuatan geometri, meshing, dan penentuan kondisi batas menggunakan GAMBIT 2.4.6. tahapan dalam *pre processing* antara lain sebagai berikut:

3.2.1.1 Geometri dan domain pemodelan silinder sirkular equilateraltriangular

Dalam proses analisa karakteristik aliran dilakukan pemodelan tiga silinder yang disusun secara *equilateral-triangular* dua dimensi. Gambar 3.3 menunjukkan domain geometri yang akan disimulasikan.





Gambar 3.3 Domain simulasi numerik

3.2.1.2 Meshing dan Kondisi Batas

Pembuatan *mesh* elemen hingga (*meshing*) adalah pembagian model solid menjadi elemen-elemen kecil sehingga kondisi batas dan beberapa parameter yang diperlukan dapat diaplikasikan ke dalam elemen-elemen tersebut. Pada proses pembuatan *mesh* terdapat metode *bottom-up* dan *top-down*. Pembuatan *mesh* pada penelitian ini dilakukan dengan metode *bottom-up*, dimana *mesh* dibuat dari entity geometri yang paling rendah, yaitu garis, kemudian bidang dan yang terakhir adalah volume.

Pada gambar 3.3, kondisi batas yang digunakan adalah *inlet: velocity inlet; outlet: outflow;* silinder utama dan bodi pengganggu: *wall; upper* dan *lower: symmetry*. Kondisi batas *velocity inlet* digunakan untuk mendefinisikan kecepatan aliran pada sisi masuk aliran. Kondisi batas ini digunakan untuk aliran *incompressible* (sesuai dengan batasan masalah yang telah didefinisikan). Kondisi batas *outflow* digunakan karena nilai tekanan di daerah *inlet* tidak diketahui sehingga tidak menggunakan *pressure outlet*.

Geometri yang telah di *mesh* pada gambar 3.4 dan ditentukan kondisi batasnya, di *export* dalam format .msh dan selanjutnya dilakukan *processing* dan *post processing* pada CFD komersial. Simulasi dilakukan dengan memvariasikan sudut bodi pengganggu pada bagian *upstream main* silinder dengan analisa 2D.

Pada akhir simulasi, dilakukan *post processing* dengan menampilkan hasil simulasi yang kemudian akan dianalisa terhadap hasil yang telah diperoleh berupa data kualitatif dan kuantitatif.



Gambar 3.4 Hasil Meshing 2D, (a) *meshing quadrilateral submap*; (b) *meshing* penampang setengah silinder

(a)

3.2.2 Processing

Langkah-langkah processing dijelaskan sebagai berikut:

a. Models

Pada langkah ini dilakukan pemodelan aliran yang meliputi solver dan viscous. Untuk solver dipilih unsteady dan second order implicit. Sedangkan untuk viscous dipilih k- ω SST dimana untuk memadukan formulasi k- ω

standar yang stabil dan akurat pada daerah dekat dinding dengan model k- ε yang mempunyai kelebihan pada aliran *freestream*.

b. Material

Properties material yang dimasukkan adalah *properties* udara yang disesuaikan dengan kondisi udara di sekitar perlatan yang akan dijadikan hasil pembanding. Temperatur udara yang digunakan adalah 26.7°C dengan viskositas 1.84458 x 10⁻⁵ kg/m-s.

c. Operating Condition

Kondisi STP (*Standard Temperature and Pressure*) diatur sebagai kondisi operasi simulasi numerik yaitu 1 atm atau 101.325 Pascal.

d. Boundary Condition

Pada langkah ini dilakukan penentuan untuk beberapa parameter dan batasan yang terjadi pada aliran yang melewati benda uji berupa *inlet: velocity inlet* sebesar 17 m/s atau pada $\text{Re}_d = 2.2 \times 10^4$ yang didasarkan pada diameter silinder.

Solution

e.

Untuk solution controls pada pressure: standart, momentum turbulent kinetic dan specific dissipation rate menggunakan second order upwind. **f.** Initialize

Initialize dari proses ini diambil dari velocity inlet.

g. Monitor

Bagian pada langkah ini merupakan tahapan penyesuaian masalah berupa proses iterasi. Karena pada *solver* dipilih *unsteady* dan *second order implicit* maka nilai konvergensi yang dipakai yakni 10⁻³.

h. Reference Value

Pada bagian ini nilai yang dimasukkan adalah dari *inlet* dan reference zone berupa *fluid*.

i. Iterate

Proses ini merupakan proses perhitungan secara numerik. Karena *unsteady*, maka ada beberapa nilai yang harus ditambahkan, antara lain *time step size* sebesar 0.000294 sec, *number of time step* sebanyak 500 kali, dan maksimal

iterasi yang digunakan yaitu 25 kali. Nilai *time step size* didapatkan dari perhitungan *Strouhal number*.

$$D = 25 \text{ mm} = 0.025 \text{ m}$$
$$St = \frac{f \times D}{U}$$

 $0.2 = \frac{f \ x \ 0.025 \ m}{17 \ m/s}$

 $f = \frac{17^{m} / _{s} \times 0.2}{0.025}$

 $t = \frac{1}{f} = \frac{1}{136/s} = 7.352941176 \ x \ 10^{-3} sec$

Time step size = $\frac{7.352941176 \times 10^{-3} sec}{25 (number of time step)} = 0.000294 sec$

Keterangan:

St

D

U

= 136/s

= Strouhal number

= diameter silinder utama (m)

= kecepatan freestream (m/s)

= periode (sec)

3.2.3 Post Processing

Post processing adalah proses menampilkan hasil serta analisa terhadap hasil yang diperoleh. Adapun data yang akan diambil antara lain distribusi tekanan, koefisien drag, visualisasi aliran berupa grid display, pathline, countur plot, dan profil kecepatan dari tiga silinder yang disusun secara equilateral dengan penambahan bodi pengganggu. Hasil yang diperoleh akan dibandingkan dengan hasil eksperimen pada penelitian ini.

3.2.4 Grid Independency dan Number of Time Step

Grid independency dilakukan untuk membandingkan kerapatan meshing dari yang renggang (coarse) hingga rapat (fine) yang hasilnya akan dikomparasi dengan penelitian Gu&Sun (2000). Adapun hasil *meshing* yang didapatkan yaitu: Tabel 3.3 Grid Independent untuk *meshing* simulasi

| No. | Meshing | Jumlah | Nilai CD | | | | | |
|-----|----------|--------|---------------|---------------|---------------|--|--|--|
| | WW II. | Node | Silinder 1 | Silinder 2 | Silinder 3 | | | |
| 1. | Gu & Sun | | 0.89 | 0.9 | 1.0 | | | |
| 2. | A | 22686 | 1.023 (14.9%) | 1.072 (19.1%) | 1.232 (23.2%) | | | |
| 3. | В | 25430 | 0.749(15.8%) | 1.245 (38.3%) | 1.119 (11.9%) | | | |
| 4. | С | 28174 | 0.881(1,01%) | 1.14 (26.67%) | 1.106 (10.6%) | | | |
| 5. | D | 28517 | 0.875 (1,69%) | 1.16 (22,4%) | 1.064 (6,4%) | | | |

Berdasarkan nilai eror yang diperoleh pada setiap meshing yang dilakukan pada tabel 3.3, maka dipilih *meshing* C dengan nilai eror terhadap koefisien *drag* pada penelitian Gu dan Sun yang paling terkecil.

Sedangkan untuk *number of time step* didapatkan dari fluktuasi *lift* yang terjadi pada ketiga silinder utama untuk rentang waktu yang berbeda sehingga didapatkan nilai *Strouhal number* yang konstan pada *time step* tertentu. Berikut ini merupakan contoh perhitungan untuk mendapatan *number of time step* pada variasi tanpa IDB di silinder 2.





Berikut merupakan nilai *Strouhal number* dan y⁺ untuk semua variasi sudut IDB pada ketiga silinder sehingga didapatkan *number of time step* yang digunakan pada *processing*.

| No | Time | S | 25 | Silind | er 1 | L.S. | 15 | | Silind | ler 2 | | AL. | | Silind | ler 3 | |
|------|------|-----------------|--------|--------|--------|-----------------|--------|--------|--------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| sten | | Strouhal number | | | | Strouhal number | | | | Strouhal number | | | | | | |
| | | Tanpa | IDB | IDB | IDB | IDB | Tanpa | IDB | IDB | IDB | IDB | Tanpa | IDB | IDB | IDB | IDB |
| 7 | | IDB | 20° | 30° | 40° | 60° | IDB | 20° | 30° | 40° | 60° | IDB | 20° | 30° | 40° | 60° |
| 1. | 200 | 0.2376 | 0,3752 | 0,3376 | 0,0375 | 0,0250 | 0.2376 | 0,1906 | 0,2001 | 0,0500 | 0,0250 | 0.2251 | 0,2126 | 0,1876 | 0,0875 | 0,0150 |
| 2. | 300 | 0.2251 | 0,3877 | 0,4002 | 0,0500 | 0,0375 | 0.1751 | 0,2251 | 0,1751 | 0,0500 | 0,0250 | 0.2001 | 0,2001 | 0,1751 | 0,1376 | 0,0250 |
| 3. | 400 | 0.2251 | 0,4127 | 0,4252 | 0,0250 | 0,0375 | 0,1876 | 0,2001 | 0,2126 | 0,0625 | 0,0375 | 0,2001 | 0,2501 | 0,2001 | 0,0250 | 0,0250 |
| 4. | 500 | 0.2251 | 0,3251 | 0,3501 | 0,0500 | 0,0250 | 0,1876 | 0,2001 | 0,2326 | 0,0625 | 0,0125 | 0,2001 | 0,2251 | 0,2401 | 0,0875 | 0,0250 |
| 5. | 600 | 0.2251 | 0,3251 | 0,3501 | 0,0500 | 0,0250 | 0,1876 | 0,2001 | 0,2326 | 0,0625 | 0,0125 | 0,2001 | 0,2251 | 0,2401 | 0,0875 | 0,0250 |
| 6. | 700 | 0.2251 | 0,3251 | 0,3501 | 0,0500 | 0,0250 | 0,1876 | 0,2001 | 0,2326 | 0,0625 | 0,0125 | 0,2001 | 0,2251 | 0,2401 | 0,0875 | 0,0250 |

Tabel 3.4 Range waktu pengambilan CL

Berdasarkan nilai Strouhal *number* yang ada pada tabel 3.4, dapat diketahui bahwa pada *time step* 500, nilai Strouhal *number* untk ketiga silinder pada berbagai variasi sudah konstan. Dengan demikian untuk *range* waktu pengambilan C_L dapat menggunakan *time step* = 500. Sedangkan untuk nilai y⁺ dapat dilihat pada tabel 3.5 berikut.

Tabel 3.5 Nilai y⁺

| No. | Variasi IDB | Nilai y ⁺ maks | | | |
|-----|-------------------------|---------------------------|--|--|--|
| 1. | Tanpa IDB | 0.3186 | | | |
| 2. | $(\theta) = 20^{\circ}$ | 0.9478 | | | |
| 3. | $(\theta) = 30^{\circ}$ | 1.0249 | | | |
| 4. | $(\theta) = 40^{\circ}$ | 1.0408 | | | |
| 5. | $(\theta) = 60^{\circ}$ | 0.9930 | | | |



| mum of Facet Values Wall Yplus | |
|-----------------------------------|------------|
| silinder_down_2 | 0.31676337 |
| silinder down 1 | 0.31860843 |
| silinder_up | 0.25128326 |
| Net | 0.31860843 |

Gambar 3.6 Contoh pengambilan nilai y⁺





BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menampilkan hasil dan pembahasan baik secara eksperimen maupun numerik. Hasil pengukuran yang diperoleh dari eksperimen dan numerik berupa pengukuran tekanan pada kontur permukaan tiga silinder yang disusun secara *equilateral triangular* meliputi pengukuran tekanan statis dan tekanan stagnasi *free stream*, tekanan statis dan stagnasi permukaan silinder *upstream* maupun *downstream* dengan IDB, dan pengukuran tekanan statis dan stagnasi di belakang silinder yang disusun *equilateral triangular* dengan variasi sudut IDB. Hasil pengukuran tersebut diolah sehingga diperoleh nilai distribusi koefisien tekanan pada permukaan silinder *upstream* maupun *downstream*, koefisien drag silinder *upstream* maupun *downstream*, dan profil kecepatan di daerah *wake* untuk susunan silinder *equilateral triangular*. Sedangkan hasil *post-processing* simulasi numerik berupa *velocity pathline* digunakan untuk memperjelas fenomena yang terjadi pada permukaan tiga silinder yang disusun secara *equilateral triangular*.

Struktur penulisan pada bab ini secara garis besar membahas pengaruh penambahan IDB terhadap koefisien *drag* pada tiga silinder sirkular yang disusun secara *equilateral triangular* dengan berbagai variasi sudut IDB (θ) pada jarak antar silinder (S/D) tetap. Hasil dan pembahasan pada bab ini didahului dengan analisa distribusi koefisien tekanan pada masing-masing silinder sirkular. Hasil yang ditampilkan yaitu selain distribusi koefisien tekanan tiga silinder yang disusun secara *equilateral triangular* tanpa penambahan IDB juga untuk variasi sudut IDB (θ): 20°, 30°, 40°, dan 60° dengan S/D: 2. Selanjutnya ditampilkan hasil dari koefisien *drag* yang dihasilkan oleh oleh masing-masing silinder dengan adanya penambahan IDB pada berbagai variasi sudut IDB. Setelah itu juga menganalisa profil kecepatan di daerah *wake* pada masing-masing silinder. Sebagai penjelas data kuantitatif yang diperoleh secara eksperimen, ditampilkan *velocity pathline* untuk variasi sudut IDB (θ): 20°, 30°, 40°, dan 60° (20°, 30°, 40°, dan 60° dengan S/D: 20°, 30°, 40°, dan 60° dengan S/D: 20°, 30°, 40°, dan 60° dengan secara eksperimen, ditampilkan penambahan IDB pata berbagai variasi sudut IDB. Setelah itu juga menganalisa profil kecepatan di daerah *wake* pada masing-masing silinder. Sebagai penjelas data kuantitatif yang diperoleh secara eksperimen, ditampilkan *velocity pathline* untuk variasi sudut IDB (θ): 20°, 30°, 40°, dan 60° dengan S/D: 2 secara numerik.

- 4.1 Distribusi Koefisien Tekanan Silinder pada Tiga Silinder Sirkular yang Disusun secara *Equilateral Triangular*
 - 4.1.1 Distribusi Koefisien Tekanan pada Silinder Tanpa IDB

Dalam subbab ini menampilkan data kuantitatif meliputi distribusi koefisien tekanan (Cp) yang diperoleh dengan menggunakan persamaan 3.3 untuk susunan *equilateral triangular* tanpa *IDB*. Gambar 4.1 (a) dan (b) masing-masing menunjukkan grafik distribusi koefisien tekanan untuk ketiga silinder berdasarkan hasil eksperimen dan numerik.

Pada gambar 4.1 (a), setelah titik stagnasi, aliran mengalami percepatan yang ditandai dengan menurunnya grafik koefisien tekanan secara ekstrem hingga aliran memiliki kecepatan maksimum yang ditandai dengan nilai distribusi koefisien tekanan paling rendah. Pada *upper side*, aliran mengalami kecepatan maksimum pada sudut sekitar 55°-78°, sedangkan pada *lower side*, aliran mengalami kecepatan maksimum pada sudut 295°-305°. Kemudian aliran mengalami perlambatan akibat adanya *adverse pressure* yang ditandai peningkatan tekanan. Pada satu titik, aliran tidak mampu lagi melawan *adverse pressure* dan gesekan sehingga terjadi separasi yang ditandai dengan nilai koefisien tekanan mulai *steady* pada sudut 90° untuk *upper side* dan 280° untuk *lower side* pada silinder 1. Sedangkan pada silinder 2 dan tiga masing-masing untuk *upper side* pada sudut 75° dan 60°, dan untuk bagian *lower side* masing-masing pada sudut 280° dan 290°.





Gambar 4. 1. Grafik distribusi koefisien tekanan silinder, tanpa IDB (θ=0°) pada *time-averaged*, (a) eksperimen; (b) Cp Gu dan Sun; (c) numerik — silinder 1, ---- silinder 2, --- silinder 3

Pada gambar 4.1 (b) untuk *upper dan lower side* pada masingmasing silinder nilai akselerasi maksimum terjadi pada sudut yang hampir sama dengan hasil eksperimen pada penelitian ini. Namun pada daerah *base pressure*, untuk silinder 2 dan 3 pada sudut ±180° distribusi koefisien *pressure* berdekatan. Hal ini dikarenakan bilangan Re yang digunakan Gu dan Sun (2000) lebih tinggi daripada Re yang digunakan pada penelitian ini.

Sedangkan pada gambar 4.1 (c) tren yang ditunjukkan hampir sama dengan hasil yang ditunjukkan pada eksperimen 4.1 (a). Hanya saja akselerasi maksimum untuk hasil numerik lebih tinggi dibandingkan dengan eksperimen. Hal ini dibuktikan dengan nilai Cp pada hasil numerik yang sampai mencapai

4.1.2 Distribusi Koefisien Tekanan pada Silinder pada sudut IDB (θ) = 20°

-2,4.

Pada gambar 4.2 (a) dibawah, menunjukkan *trend* yang hampir sama untuk masing-masing silinder. Akselerasi maksimum yang lebih dominan terjadi pada silinder 3 dimana koefisien *pressure* pada silinder 3 mencapai nilai -1,8. Setelah mencapai kecepatan maksimum, aliran mulai mengalami perlambatan kemudian terjadi separasi. Namun adanya momentum aliran yang lebih besar dari momentum aliran yang terseparasi dan adanya pengaruh *wake* dari *IDB*, menyebabkan *shear layer* yang terlepas mengalami *re-attachment* pada permukaan silinder *upstream* yang ditandai dengan adanya *peak*. Kemudian aliran mengikuti kontur permukaan silinder kembali yang ditandai penurunan tekanan hingga sudut 80°-90° dan aliran mengalami perlambatan kembali dikarenakan aliran yang tidak mampu menahan *adverse pressure gradient* hingga terjadi separasi pada sudut 115°-120° pada *upper side* dan sudut 265°-270° untuk *lower* side.

Pada gambar 4.1 (a), daerah *base pressure* untuk silinder 1 mengalami *reattachment* yang diakibatkan oleh adanya *shear layer* yang terlepas dan ditandai dengan adanya *peak*. Hal ini dapat dilihat pada gambar *velocity pathline* untuk IDB (θ) = 20°. Sedangkan pada silinder 3, mengalami percepatan aliran hingga titik maksimum pada sudut 170°. Percepatan ini dikarenakan aliran tertarik ke bagian *lower* dimana pada bagian *lower side* daerah *wake* yang terbentuk lebih lebar dibandingkan daerah *upper side*, kemudian aliran mengalami perlambatan pada sudut 170°-190°





Gambar 4. 2. Grafik distribusi koefisien tekanan silinder, sudut IDB (θ =20°) pada *time-averaged*, (a) eksperimen; (b) numerik silinder 1, ---- silinder 2, --- silinder 3

Untuk grafik yang ditunjukkan pada gambar 4.2 (b), tren yang terjadi pada silinder 1, 2, dan 3 hampir sama dengan grafik eksperimen, namun pada daerah *base pressure* silinder 2 dan 3 berkebalikan dengan yang ditunjukkan pada grafik 4.2 (a). Hal ini terjadi dikarenakan adanya pengaruh dari penentuan batas *boundary* pada simulasi, dimana untuk ekperimen pengaruh *blockage ratio* sangat besar, sedangkan pada numerik batas *upper* dan *lower* dikondisikan simetri.

4.1.3 Distribusi Koefisien Tekanan pada Silinder pada sudut IDB (θ) = 30°

Gambar 4.3 (a) menunjukkan distribusi koefisien tekanan yang terjadi jika adanya penambahan IDB dengan sudut 30°. Setelah titik stagnasi terjadi akselerasi yang ditandai dengan nilai Cp berangsurangsur menurun, hingga terjadi akselerasi maksimum pada sudut 38°-40° untuk ketiga silinder di sisi *upper* dan sudut di sisi *lower* 325°-360°. Akibat adanya *adverse pressure gradient*, aliran mengalami perlambatan pada sudut 55°- 60° pada sisi *upper* dan pada sudut 300°-

325° pada sisi lower. Kemudian koefisien tekanan cenderung turun kembali. Setelah itu tekanan cenderung meningkat karena harus melawan adverse pressure dan friksi seperti yang terlihat pada grafik Cp, hingga aliran tidak mampu melawan adverse pressure dan friksi yang menyebabkan terjadinya separasi. Titik separasi pada bagian *upper side* terjadi pada sudut $\pm 110^{\circ}$ untuk silinder 1, $\theta = \pm 85^{\circ}$ untuk silinder 2, dan $\theta = \pm 125^{\circ}$ untuk silinder 3, sedangkan bagian *lower side* untuk silinder 1 dan 2 setelah adanya adverse pressure, aliran tidak mampu lagi melawannya sehingga terjadi separasi dengan ditandai nilai koefisien tekanan yang mulai steady pada sudut $\theta = \pm 300^{\circ}$ untuk silinder 1 dan $\theta = \pm 320^{\circ}$ untuk silinder 2. Tapi untuk silinder 3 pada sudut $\theta = \pm 275^{\circ}$ aliran mengalami peningkatan kecepatan kembali hingga sudut $\theta = \pm 265^\circ$. Setelah itu aliran yang melewati silinder 3 baru mengalami separasi yang ditunjukkan pada sisi *upper* sekitar θ = $\pm 120^{\circ}$ dan pada sisi *lower*, $\theta = \pm 240^{\circ}$. Fluktuasi yang terjadi pada bagian upper dan lower side untuk silinder 3 disebabkan bubble separation yang terbentuk di daerah belakang IDB sehingga mengakibatkan aliran yang melewati kontur permukaan silinder 3 menjadi berfluktuasi.





Gambar 4.3. Grafik distribusi koefisien tekanan silinder, sudut IDB (θ =30°), pada *time-averaged*, (a) eksperimen; (b) numerik silinder 1, ---- silinder 2, --- silinder 3

Untuk distribusi koefisien tekanan pada hasil numerik menunjukkan hasil sedikit berbeda pada bagian reattachment aliran. Pada gambar 4.3 (b) menjelaskan bahwa aliran mengalami akselerasi maksimum lebih tinggi dibandingkan dengan hasil yang ditunjukkan pada eksperimen. Hal ini ditandai dengan nilai Cp yang mencapai -3, sedangkan pada eksperimen hanya sebesar -1,8. Setelah akselerasi maksimum, aliran mengalami perlambatan hingga pada suatu titik dimana aliran sudah tidak mampu lagi melawan adverse pressure gradient yang ditandai dengan adanya peak pada sudut 50°-70°. Setelah separasi, aliran yang melewati silinder 2 mengalami percepatan aliran hingga sudut ±235°. Hal ini dikarenakan adanya *wake* yang terbentuk di belakang silinder 2 menyebabkan aliran yang melewati kontur permukaan silinder tertarik ke daerah wake sehingga percepatan aliran terjadi. Sebaliknya untuk silinder 3, pada sudut 205°-235°, aliran mengalami perlambatan yang dikarenakan adanya bubble separation pada daerah tersebut.

4.1.4 Distribusi Koefisien Tekanan pada Silinder pada sudut IDB

 $(\theta) = 40^{\circ}$

Selanjutnya untuk variasi sudut (θ =40°), nilai distribusi koefisien tekanan pada eksperimen dan numerik menunjukkan tren yang hampir sama. Pada gambar 4.4 (a), titik stagnasi tepat pada sudut 0°, setelah titik stagnasi aliran mengalami percepatan yang tidak terlalu signifikan. Hal ini disebabkan adanya celah antara *IDB* dan permukaan silinder, sehingga aliran mengalami hambatan. Kemudian pada sudut (θ) = ±35°, aliran mulai mengalami percepatan yang signifikan hingga mencapai kecepatan maksimum pada sudut 40°-50° untuk *upper side* dan 310°-315° untuk *lower side*. Setelah mencapai kecepatan maksimum, aliran mulai mengalami perlambatan kemudian terjadi separasi pada sudut ±55° dan aliran yang melewati kontur permukaan mulai *steady* hingga pada sudut ±170° aliran mengalami perlambatan yang diakibatkan *shear layer* yang terlepas sehingga aliran mengalami

Untuk silinder 3 pada daerah *base pressure* terjadi percepatan aliran pada sudut (θ) = 140°-180° untuk daerah *upper side*. Hal ini dikarenakan adanya *wake* yang terbentuk dibelakang silinder 3 mengakibatkan aliran yang berada di daerah *upper side* tertarik ke belakang.



Pada gambar 4.4 (b) terlihat bahwa distribusi koefisien tekanan pada tiga silinder sirkular, D = 25 mm dengan variasi sudut IDB (θ) = 40^{0} memiliki kesesuaian yang mendekati dengan hasil eksperimen. Perbedaan daerah *reattachment*, akselerasi maksimum, dan letak Cp base disebabkan oleh persamaan *model turbulence* yang digunakan, kekasaran permukaan, *density* yang sama dan ketelitian alat ukur dan pemasangan benda uji eksperimen.

4.1.5 Distribusi Koefisien Tekanan pada Silinder pada sudut IDB $(\theta) = 60^{\circ}$

Pada variasi sudut IDB $(\theta) = 60^\circ$, titik stagnasi untuk masingmasing silinder berbeda baik sisi upper maupun lower. Namun untuk tren yang ditunjukkan pada gambar 4.5 (a) dan 4.5 (b) hampir sama, hanya berbeda pada nilai koefisien tekanan saja. Pada gambar 4.5 (a) untuk silinder 1 titik stagnasinya tepat berada pada sudut 0°. Setelah titik stagnasi, aliran mengalami percepatan namun sebelum melalui sisi celah aliran mengalami perlambatan yang disebabkan adanya blockage effect akibat celah yang terbentuk antara silinder upstream dan IDB. Hal ini terlihat dari adanya fluktuasi yang sangat kecil sebelum sudut 60° vaitu sudut yang memiliki celah tersempit. Kemudian aliran mulai mengalami percepatan pada sudut 55° hingga mencapai kecepatan maksimum pada sudut 65°. Sesaat setelah mencapai kecepatan maksimum, aliran mengalami perlambatan dan langsung mengalami separasi pada sudut 70°. Hal ini disebabkan momentum aliran freestream maupun wake dari IDB tidak mampu mendorong shear layer yang terlepas tidak dapat kembali attach pada kontur silinder.

Sedangkan titik stagnasi bagian *upper side* untuk silinder 2 dan 3 masing-masing adalah 0.3 dan 0.1. Untuk bagian *lower side* berada pada titik -0.3 dan 0.15. Titik stagnasi yang berbeda pada silinder 2 dan 3 dikarenakan adanya pengaruh dari sudut IDB yang berada pada silinder 1. Hal ini mengakibatkan aliran yang mengalir setelah silinder 1 mengalami *reattachment* sehingga mempengaruhi arah aliran yang akan melewati silinder 2 dan 3.

Karena adanya pengaruh *reattachment* yang terjadi di silinder 1, maka aliran yang menuju ke silinder 3 mengalami perlambatan pada bagian *upper side* sekitar sudut (θ) = ±20° dan bagian *lower side* pada sudut (θ) = ±340°. Sedangkan pola aliran yang terjadi pada silinder 2 berlawanan dengan silinder 3, dimana terjadi percepatan pada bagian *upper side* sekitar sudut $(\theta) = \pm 30^{\circ}$ dan bagian *lower side* pada sudut $(\theta) = \pm 335^{\circ}$. Setelah itu, aliran mengalami akselerasi maksimum untuk ketiga silinder pada bagian *upper side* pada sudut $(\theta) = 55^{\circ}-65^{\circ}$ dan bagian *lower side* pada sudut $(\theta) = 300^{\circ}-310^{\circ}$. Sedangkan untuk silinder1 pada sudut 160° aliran mengalami perlambatan yang dikarenakan adanya friksi dan *blockage effect* yang besar akibat celah yang terbentuk antara *main* silinder dan IDB menyebabkan separasi yang terjadi lebih awal sehingga aliran mengalami *reattachment*. Kemudian untuk silinder 2 pada sudut 165° aliran mengalami perlambatan hingga sudut 255° . Perlambatan ini terjadi karena adanya *wake* yang terbentuk di belakang IDB bagian *upper side* sehingga distribusi kecepatan aliran yang melewati kontur permukaan dibelakang IDB mengalami penurunan. Hal ini dibuktikan dengan nilai koefisien tekanan yang meningkat. Hal ini juga terjadi pada grafik numerik yang ditunjukkan pada gambar 4.5 (b).





pada *time-averaged*, (a) eksperimen; (b) numerik silinder 1, ---- silinder 2, --- silinder 3

Pada gambar 4.5 (b) terlihat bahwa distribusi koefisien tekanan pada tiga silinder sirkular, D = 25 mm dengan variasi sudut IDB (θ) = 60° memiliki kesesuaian yang mendekati dengan hasil eksperimen dimana terdapat puncak *peak* pada sudut = 180° untuk hasil eksperimen dan 175° untuk hasil numerik. Perbedaan daerah *reattachment*, akselerasi maksimum, dan letak Cp *base* disebabkan oleh persamaan *model turbulence* yang digunakan, kekasaran permukaan, *density* yang sama dan ketelitian alat ukur dan pemasangan benda uji eksperimen. Tetapi untuk akselerasi maksimum pada grafik numerik lebih tinggi dibandingkan dengan hasil yang ditunjukkan pada grafik eksperimen.

4.1.6 Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan Silinder pada Berbagai Sudut Variasi IDB

Dalam subbab ini menampilkan data kuantitatif berupa distribusi koefisien tekanan (Cp) yang diperoleh untuk susunan equilateral triangular dengan berbagai yariasi sudut IDB pada masing-masing silinder. Masing-masing silinder dibandingkan untuk

berbagai variasi sudut IDB agar mengetahui perbedaan distribusi koefisien tekanan yang terjadi di tiap variasi sudut IDB.

Pada gambar 4.6 (a) terlihat bahwa pada silinder upstream (silinder 1) distribusi koefisien tekanan tertinggi didapatkan pada sudut IDB 30°, titik stagnasi untuk semua variasi berada pada titik 0. Setelah itu aliran mengalami akselerasi maksimum pada sudut yang berbeda-beda untuk tiap variasi sudut IDB. Separasi aliran yang lebih tertunda ke belakang diperoleh pada sudut IDB 30°, sekitar ±110°. Sedangkan pada variasi sudut IDB 60°, setelah titik stagnasi, aliran mengalami percepatan namun sebelum melalui sisi celah aliran mengalami perlambatan yang disebabkan adanya blockage effect akibat celah yang terbentuk antara silinder upstream dan IDB. Hal ini terlihat dari adanya fluktuasi yang sangat kecil sebelum sudut 60° yaitu sudut yang memiliki celah tersempit. Kemudian aliran mulai mengalami percepatan pada sudut 55° hingga mencapai kecepatan maksimum pada sudut 65°. Sesaat setelah mencapai kecepatan maksimum, aliran mengalami perlambatan dan langsung mengalami separasi pada sudut 70°. Hal ini disebabkan momentum aliran freestream maupun wake dari IDB tidak mampu mendorong shear layer yang terlepas tidak dapat kembali attach pada kontur silinder.



(a)



dapat terlihat jelas bahwa untuk variasi sudut IDB 60° titik stagnasi bagian upper side untuk silinder 2 dan 3 masing-masing adalah 0.3 dan 0.1. Untuk bagian lower side berada pada titik -0.3 dan 0.15. Titik stagnasi yang berbeda pada silinder 2 dan 3 dikarenakan adanya pengaruh dari sudut IDB yang berada pada silinder 1. Hal ini mengakibatkan aliran yang mengalir setelah silinder 1 mengalami reattachment sehingga mempengaruhi arah aliran yang akan melewati silinder 2 dan 3. Sedangkan pada hasil numerik, seperti yang ditunjukkan gambar 4.7 (a) distribusi koefisien tekanan pada kelima variasi hampir berdekatan. Hal ini dikarenakan posisi silinder 1 berada di depan, seperti silinder sirkular tunggal. Pada bagian upper side dan lower side juga menunjukkan tren yang sama. Pada gambar 4.7 (b) untuk silinder downstream (silinder 2) akselerasi maksimum terjadi pada variasi sudut 60°. Hal ini juga ditunjukkan pada hasil eksperimen untuk silinder 2. Perbedaan daerah reattachment, akselerasi maksimum, dan letak Cp base disebabkan oleh persamaan model turbulence yang digunakan, kekasaran permukaan, density yang sama dan ketelitian alat ukur dan pemasangan benda uji eksperimen. Tetapi untuk akselerasi maksimum pada grafik numerik lebih tinggi dibandingkan dengan hasil yang ditunjukkan pada grafik eksperimen.

Pada silinder 3 untuk semua variasi sudut IDB dapat dilihat pada gambar 4.7 (c). Pada variasi sudut IDB 40°, untuk silinder 3 pada daerah *base pressure* terjadi percepatan aliran pada sudut (θ) = 140°-180° untuk daerah *upper side*. Hal ini dikarenakan adanya *wake* yang terbentuk dibelakang silinder 3 mengakibatkan aliran yang berada di daerah *upper side* tertarik ke belakang. Sedangkan untuk variasi sudut IDB lainnya pada daerah *base pressure* cenderung konstan.




Gambar 4.7 Grafik distribusi koefisien tekanan silinder pada berbagai variasi sudut IDB pada *time-averaged* untuk hasil numerik, (a) silinder 1; (b) silinder 2; (c) silinder 3

Pembahasan selanjutnya mengenai distribusi profil kecepatan di belakang konfigurasi silinder yang diperoleh baik secara eksperimen maupun numerik. Pada bagian ini ditampilkan profil kecepatan maksimum *thickness* maupun pada daerah *wake* di belakang konfigurasi silinder untuk berbagai variasi.

Hasil distribusi profil kecepatan ditunjukkan pada gambar 4.8 untuk konfigurasi tiga silinder sirkular yang disusun *equilateral triangular* dengan variasi IDB (θ) = 20°; (θ) = 30°; (θ) = 40°; (θ) = 60°, defisit momentum yang terbesar terjadi pada hasil eksperimen, hal ini ditandai dengan nilai *U/Umaks* yang paling rendah untuk masingmasing variasi pada hasil eksperimen dibandingkan dengan hasil numerik. Pada gambar 4.8 (a) dan 4.8 (b), defisit momentum yang terjadi lebih kecil dibandingkan dengan defisit momentum pada gambar 4.8 (c) dan 4.8 (d). Defisit momentum terbesar terjadi pada variasi IDB (θ) = 40° sebesar 0.04. Sedangkan yang paling terkecil terjadi pada variasi IDB (θ) = 30°. Hasil ini menunjukkan bahwa aliran yang melintasi silinder *upstream* melingkupi silinder *downstream*





dan (θ) = 60° pada gambar 4.8 (c) dan 4.8 (d), daerah wake yang terjadi

semakin lebar. Namun, untuk daerah *wake* antara hasil ekperimen dan numerik pada masing-masing variasi menunjukkan bahwa *wake* tersempit ditunjukkan pada hasil numerik. Hal ini dikarenakan *wake* yang terjadi pada hasil eksperimen selain dipengaruhi oleh variasi IDB juga pengaruh dari adanya *blockage ratio* yang cukup besar.

4.2 Koefisien Drag Pressure pada Tiga Silinder Sirkular yang Disusun secara Equilateral Triangular

Pada penelitian ini juga menghitung nilai koefisien *drag pressure* yang dihasilkan baik secara eksperimen maupun numerik untuk mengetahui sudut IDB berapakah yang menghasilkan koefisien *drag pressure* terkecil sehingga mampu mereduksi gaya *drag* yang lebih baik dibandingkan dengan tanpa menggunakan IDB. Besarnya koefisien *drag pressure* (Cdp) terhadap bilangan *Reynolds number* ditunjukkan pada tabel 4.1 dan 4.2. Hasil yang didapatkan pada tiga silinder silinder sirkular yang disusun *equilateral triangular* berdasarkan bilangan *Reynolds* sebesar 2.2×10^4 .

| No. | Variasi | Koefisien Drag Eksperimen | | | |
|------|-----------------------------|---------------------------|----------------|---------------|--|
| | | Silinder 1 | Silinder 2 | Silinder 3 | |
| 1.00 | Gu & Sun (paper) | 0,89 | 0,9 | 1 1 I | |
| 2. | Tanpa IDB | 0,878 | 1,089 | 1,282 | |
| 3. | IDB $(\theta) = 20^{\circ}$ | 0,504 | 0,437 | 0,631 | |
| 4. | IDB $(\theta) = 30^{\circ}$ | 0,258 (71,01%) | 0,705 (21,66%) | 0,607 (39,9%) | |
| 5. | $IDB(\theta) = 40^{\circ}$ | 0,911 | 1,494 | 1,715 | |
| 6. | IDB $(\theta) = 60^{\circ}$ | 1,458 | 1,953 | 1,389 | |

Tabel 4.1 Koefisien drag hasil eksperimen

Pada tabel 4.1, nilai koefisien *drag* terkecil dihasilkan pada tiga silinder sirkular yang disusun secara *equilateral triangular* dengan variasi sudut IDB $(\theta) = 30^{\circ}$. Namun, pada variasi $(\theta) = 40^{\circ}$ dan $(\theta) = 60^{\circ}$ nilai koefisien *drag* justru meningkat dibandingan tanpa IDB dan penelitian yang dilakukan oleh **Gu&Sun (2000)**. Sedangkan untuk gambar 4.7 (a) nilai koefisien *drag* terbesar terdapat pada variasi sudut IDB $(\theta) = 40^{\circ}$, dan untuk nilai koefisien *drag* pada sudut IDB $(\theta) = 60^{\circ}$ silinder 2 dan 3 hasilnya lebih rendah dibandingkan dengan yang 40°, namun pada silinder 1 nilai koefisien *drag* terbesar pada sudut 60°. Nilai koefisien *drag* pada silinder 1 hasil yang didapatkan sama dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Dias (2013) dan Gu&Sun (2000) yang menjelaskan bahwa reduksi gaya *drag* terbesar terjadi pada penambahan IDB dengan sudut 30° namun pada sudut 40° dan 60°, reduksi gaya *drag* justru semakin berkurang, begitu pula yang terjadi pada tren gambar 4.7 (b). Hal ini membuktikan bahwa dengan adanya penambahan IDB yang diletakkan dibagian *upstream* masing-masing silinder mampu mereduksi gaya *drag* jika dibandingkan tanpa menggunakan IDB, namun seiring variasi IDB yang diletakkan semakin ke belakang silinder utama, maka gaya *drag* yang dihasilkan justru semakin besar. Pengaruh dari sudut IDB yang semakin ke belakang justru membuat separasi terjadi di awal, sehingga mengakibatkan *wake* yang tejadi di belakang silinder semakin lebar. Nilai porsentase untuk reduksi gaya *drag* yang dihasilkan pada penelitian ini dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan oleh Gu dan Sun (2000) dapat dihitung seperti berikut:

$$\%C_{DP} = \frac{C_{D Gu\&Sun} - C_{D Penelitian}}{C_{D Gu\&Sun}} \times 100 \,\%$$

$$_{p} = \frac{(0.89 - 0.258)}{0.89} \times 100\%$$

= 71.01%

%CD

Sedangkan hasil pada tabel 4.2 menunjukkan kemampuan bodi pengganggu untuk mereduksi gaya *drag* yang terjadi pada silinder sirkular (D = 25 mm). Pada θ = 20⁰ dan 30⁰ dengan adanya bodi pengganggu menyebabkan gaya *drag* lebih tereduksi. Posisi terbaik dalam mereduksi gaya *drag* didapatkan pada θ = 30⁰. Sedangkan pada θ = 40⁰ dan θ = 60⁰, penggunaan bodi pengganggu tidak efektif lagi dalam mereduksi gaya *drag*. Namun untuk nilai koefisien *drag* pada silinder 2 dan 3 dengan variasi sudut IDB (θ) = 60⁰ hasilnya justru lebih kecil dibandingkan IDB (θ) = 40⁰.



| No | Variasi | Koefisien Drag Numerik | | | |
|------|-----------------------------|------------------------|------------|------------|--|
| 110. | | Silinder 1 | Silinder 2 | Silinder 3 | |
| 1. | Tanpa IDB | 0,867 | 0,859 | 0,914 | |
| 2. | IDB $(\theta) = 20^{\circ}$ | 0,660 | 0,782 | 0,594 | |
| 3. | $IDB(\theta) = 30^{\circ}$ | 0,378 | 0,320 | 0,422 | |
| 4. | IDB $(\theta) = 40^{\circ}$ | 0,759 | 1,249 | 1,650 | |
| 5. | IDB $(\theta) = 60^{\circ}$ | 1,165 | 0,882 | 0,878 | |

Tabel 4.2 Koefisien *drag* hasil numerik



Analisa selanjutnya adalah Strouhal number, dalam aliran unsteady biasanya akan terbentuk sebuah vortex shedding yang berada pada daerah silinder. Pada bagian ini akan dijelaskan pengaruh variasi sudut IDB (θ) terhadap Strouhal number yang dihasilkan. Pada tabel 4.3 dibawah, menunjukkan hasil Strouhal number yang didapatkan dari hasil postprocessing simulasi.

| No. | Variasi IDB | Nilai Strouhal number | | | |
|-----|-------------------------|-----------------------|------------|------------|--|
| | | Silinder 1 | Silinder 2 | Silinder 3 | |
| 1. | Tanpa IDB | 0.2251 | 0,1876 | 0,2001 | |
| 2. | $(\theta) = 20^{\circ}$ | 0,3251 | 0,2001 | 0,2251 | |
| 3. | $(\theta) = 30^{\circ}$ | 0,3501 | 0,2326 | 0,2401 | |
| 4. | $(\theta) = 40^{\circ}$ | 0,0500 | 0,0625 | 0,0875 | |
| 5. | $(\theta) = 60^{\circ}$ | 0,0250 | 0,0125 | 0,0250 | |

Tabel 4.3 Nilai Strouhal number hasil numerik

Berdasarkan tabel 4.3, nilai Strouhal *number* terbesar didapatkan dari variasi sudut IDB (θ) sebesar 30°, sedangkan yang terkecil pada variasi sudut IDB (θ) sebesar 60°. Hasil ini menunjukkan bahwa reduksi gaya *drag* yang semakin besar akan menghasilkan panas yang semakin tinggi, sehingga nilai Strouhal *number* yang dihasilkan pun semakin tinggi. **Alam, dkk (2003)** dalam penelitiannya menyimpulkan dengan baik fenomena tersebut. Alam, dkk menyebutkan bahwa frekuensi *vortex shedding* dihitung berdasarkan lebar dari *shear layer* yang bergantung pada titik separasi aliran. Separasi aliran yang tertunda menyebabkan lebar dari *shear layer* separasi berkurang, oleh karena itu nilai dari Strouhal *number* bertambah.

4.3 Karakteristik Aliran Melintasi Tiga Silinder Sirkular yang Disusun secara Equilateral Triangular

Pada bagian ini akan ditampilkan visualisasi aliran berupa *velocity pathline*, hal ini dilakukan untuk melengkapi penjelasan tentang koefisien tekanan yang terjadi pada silinder sirkular. Data kualitatif berupa *velocity pathline* pada silinder tanpa IDB ditunjukkan pada gambar 4.10 (a),

sedangkan dengan pengganggu 20⁰, 30⁰, 40⁰, dan 60⁰ masing-masing ditunjukkan pada gambar 4.10 (b); 4.10 (c); 4.10 (d); dan 4.10 (e). Pada gambar 4.10 (a), (b), (c), dan (d) titik stagnasi terjadi pada sudut 0⁰, namun pada gambar 4.10 (e) dimana variasi sudut IDB sebesar 60⁰, titik stagnasi ketiga silinder tidak tepat berada di sudut 0⁰. Letak titik stagnasi ditunjukkan dengan angka 1. Gambar 4.10 (a) menunjukkan *velocity pathline* pada tiga silinder sirkular yang disusun *equilateral triangular*. Titik stagnasi terjadi pada sudut 0⁰. Letak titik separasi ditunjukkan dengan angka 1. Setelah itu momentum yang besar menyebabkan aliran mengikuti kontur bodi silinder hingga aliran terseparasi yang diakibatkan tidak mampu melawan *adverse pressure gradient*. Letak separasi di tunjukkan dengan angka 2.







Pada gambar 4.10 (b) dimana sudut IDB (θ) = 20°, terjadi fenomena separasi bubble pada sudut dimana aliran setelah melewati silinder bodi penganggu, seperti yang diwakilkan pada gambar 4.10 (b). Fenomena separasi bubble inilah yang menyebabkan distribusi koefisien tekanan terdapat reattachment. Letak separasi bubble secara keseluruhan ditunjukkan dengan notasi angka 2. Separasi bubble ini terjadi karena adanya *mixing shear layer* dari silinder pengganggu dengan *freestream flow* menyebabkan aliran *reattach* ke silinder sirkular utama. Sedangkan untuk separasi aliran ditunjukkan dengan angka 3.

Selanjutnya variasi sudut IDB (θ) = 30°. Pada gambar 4.10 (c), untuk silinder upstream titik stagnasi tepat pada sudut 0° yang dinotasikan dengan angka 1. Setelah melewati celah antara *IDB* dan silinder upstream, aliran mengalami separasi yang kemudian kembali attach pada permukaan silinder upstream yang ditunjukkan dengan notasi angka 2. Kemudian akibat adanya adverse presure gradient positif, aliran mengalami separasi yang ditunjukkan dengan angka 3.

Angka 2 menunjukkan adanya aliran yang terperangkap. Setelah melewati celah, aliran terseparasi namun akibat adanya *wake* dari *IDB*, *shear layer* yang terlepas mengalami *re-attach* ke permukaan silinder *upstream*.

Gambar 4.10 (d) menunjukkan visualisasi velocity pathline pada tiga silinder sirkular yang tersusun secara equilateral triangular dengan variasi sudut IDB (θ) = 30°. Fenomena aliran pada IDB = 40° divisualisasikan dengan baik pada kontur velocity pathline. Pada gambar 4.10 (d) titik stagnasi terjadi pada sudut 0°, ditunjukkan dengan nomor 1. Adanya pengaruh dari sudut IDB yang semakin ke belakang dan vortex shedding menyebabkan perbedaan kontur aliran pada masing-masing silinder, pada silinder upstream, fenomena aliran menunjukkan terjadinya separasi bubble dibelakang IDB seperti yang tunjukkan dengan notasi angka 2. Sedangkan pada silinder upstream (silinder 2 dan 3), untuk separasi bubble yang paling besar tampak pada daerah di belakang IDB yang berada tepat di belakang daerah wake dari silinder upstream. Untuk separasi aliran masing masing ditunjukkan dengan angka 3. Pada gambar 4.10 (d) Aliran setelah melewati silinder pengganggu tidak dapat reattach ke silinder sirkular utama, sehingga aliran setelah wake pada silinder pengganggu seolah-olah melewati bentuk *sudden expansion* yang menyebabkan aliran tidak dapat lagi melawan momentum aliran dan terjadilah separasi masif.

Pada gambar 4.10 (e), fenomena yang terjadi pada silinder *upstream* hampir sama seperti gambar 4.10 (d) yaitu titik stagnasi terletak pada sudut 0°. Perbedaan terlihat pada titk stagnasi silinder *upstream* (silinder 2 dan 3), dimana titik stagnasi tidak berada pada sudut 0°. Hal ini dikarenakan pengaruh dari sudut IDB pada silinder *upstream* sehingga separasi aliran terjadi di awal hingga menyebabkan *wake* yang terbentuk di belakang silinder *upstream* menjadi lebih lebar dibandingkan dengan variasi sudut IDB lainnya. Pada gambar 4.10 (e) terlihat bahwa setelah melewati sisi celah, *shear layer* langsung terseparasi dan tidak mengalami *re-attachment* pada kontur permukaan silinder *upstream* seperti halnya pada gambar 4.10 (d). Hal ini disebabkan *shear layer* yang terseparasi terlalu lebar, sehingga *wake* dari *IDB* tidak mampu mendorong *shear layer* kembali ke permukaan silinder. Pada silinder dengan pengganggu 60° terjadi fenomena *small pressure gradient* seperti yang disebutkan oleh Dias (2013) dan Alam, dkk (2003) di daerah sebelum silinder (visualisasi aliran diwakilkan pada gambar 4.10 (e).

"Halaman ini sengaja dikosongkan"



BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh penambahan *Inlet Disturbance Body* (IDB) dan variasi sudut IDB terhadap karakteristik aliran fluida yang melintasi tiga silinder sirkular tersusun *equilateral triangular* yang telah dilakukan baik secara eksperimen maupun numerik, dapat disimpulkan bahwa:

- Karakteristik aliran yang terjadi pada ketiga silinder sirkular menunjukkan bahwa adanya penambahan IDB dengan berbagai variasi sudut mempengaruhi nilai koefisien *drag*. Distribusi koefisien tekanan pada IDB dengan sudut 30° untuk jarak antar silinder utama (S/D 2) pada hasil eksperimen mampu mereduksi gaya *drag* paling besar dengan nilai masing-masing untuk silinder 1 = 0.258, silinder 2 = 0.705, silinder 3 = 0,607. Sedangkan pada hasil numerik juga menunjukkan bahwa pada sudut IDB 30° nilai reduksi gaya *drag* yang terbesar dengan nilai masing-masing untuk silinder 1 = 0.378, silinder 2 = 0.320, silinder 3 = 0.422.
- Adanya pengaruh *blockage ratio* yang cukup besar khususnya untuk IDB sudut 60° pada penelitian yang dilakukan secara eksperimen menyebabkan nilai koefisien gaya *drag* lebih besar pada silinder 1 dibandingkan dengan variasi sudut lainnya. Namun pada silinder 2 dan 3, nilai koefisien gaya *drag* terbesar pada variasi sudut 40°.
- 3. Nilai Strouhal *number* yang diperoleh pada hasil numerik menunjukkan hasil yang berbanding terbalik dengan nilai koefisien gaya *drag*. Frekuensi *vortex shedding* dihitung berdasarkan lebar dari *shear layer* yang bergantung pada titik separasi aliran. Separasi aliran yang tertunda menyebabkan lebar dari *shear layer* separasi berkurang, oleh karena itu nilai dari Strouhal *number* bertambah.

5.2 Saran

Penelitian mengenai reduksi gaya *drag* saat ini selalu dikaji dan dikembangkan melalui berbagai cara. Untuk penelitian selanjutnya yang menggunakan referensi penelitian ini, ada beberapa hal yang perlu diperhatikan selama pengambilan data baik secara eksperimen maupun numerik. Adapun halhal yang perlu diperhatikan sebagai berikut:

- 1. Pengambilan data secara eksperimen harus memperhatikan kondisi udara sekitar mengingat pengambilan data dilakukan selama beberapa hari.
- 2. Kalibrasi harus dilakukan setiap pengambilan data dan setiap perubahan perbedaan variasi pengujian, baik kalibrasi Reynolds maupun kalibrasi *pressure tranduser* terhadap benda uji.
- 3. Pemutaran silinder hendaknya dilakukan dengan menggunakan alat ukur yang memiliki tingkat ketelitian tinggi agar posisi *pressure tap* tetap.
- 4. Penempatan *pitot-static tube* harus disesuaikan jaraknya dengan benda uji baik pada sisi *upstream* maupun *downstream* agar tidak mengganggu aliran sehingga menghasilkan data yang akurat.
- 5. Pada simulasi numerik perlu diperhatikan geometri dan meshing yang digunakan (*skewness* < 0.5) dan diharapkan rapat dengan *wall* agar dalam pengambilan data (*post-processing*) hasil yang didapatkan lebih akurat.



DAFTAR PUSTAKA

Alam, Md. Mahbub, Sakamoto, H., dan Moriya M. (2003), "Reduction of Fluid Forces Acting On A Single Circular Cylinder and Two Circular Cylinders by Using Tripping Rods", Journal of Fluids and Structures, Vol. 18.

 Annisa, A.D. (2014), "Studi Eksperimen dan Numerik 2D Unsteady-Rans Pengaruh Inlet Disturbance Body Terhadap Karakteristik Aliran Melintasi Dua Silinder Sirkular yang Tersusun Secara Tandem pada Saluran Sempit (Blockage Ratio 20%)", Tesis (TM 092501), Surabaya.

Bantacut. (2014), "Studi Eksperimen Pengaruh Penggunaan Inlet Disturbance Body (Idb) Terhadap Reduksi Gaya Hambat pada Tiga Silinder Sirkular dengan Susunan Stagger", Tesis (TM 092501), Surabaya

Bearman P.W., & Morel T. (1969), "*Effect of free stream turbulence on the flow around bluff bodies*", Department of aeronautics, Imperial college, London, UK.

- Fox. R. W., Mc Donald. A. T. & Pritchard. P. J. (2011), *Introduction to Fluid Mechanics Eighth Edition*, Purdue University.
- Gu Zhifu. (1996), "On Interference between Two Circular Cylinders at Supercritical Reynolds Number", Department and Engineering Science, Peking University, Beijing.
- Gu Zhifu, Sun Tianfeng. (2000), "Classifications of Flow Pattern on Three Circular Cylinders in Equilateral-triangular Arrangements". Department and Engineering Science, Peking University, Beijing.
- Igarashi, T. (1984). "Characteristics of the Flow Around Two Circular Cylinders Arranged in Tandem", Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers 27, 2380-2387, Japan.
- K. Lam, Cheung, C.W. (1988). "Phenomena of Vortex Shedding and Flow Interference of Three Cylinders in Different Equilateral Arrangements", Department of Mechanical and Marine Engineering, Hong Kong Polytechnic, Hong Kong.
- Niemann, H. J. and Holscher, N., (1990), "A Review of recent experiments on the flow past circular cylinders", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.33, 197-209.
- Prices, J. & Paidoussmis, P. (1984), "The Aerodynamic Forces Acting On Groups Of Two Or Three Circular Cylinders When Subjected To A Cross Flow", J. Wind Eng. Indust. Aero. 17, 329-347.
- Sayers, A.T., (1986), "Flow Interference between Three Equispaced Cylinders When Subjected to a Cross Flow", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Amsterdam.
- Widodo, W.A., Hidayat Nuzul. (2014), "Experimental Study of Drag Reduction on Circular Cylinder and Reduction of Pressure Drop in Narrow Channels by Using a Cylinder Disturbance Body", Applied Mechanics and Materials Vol. 493 (2014) pp 198-203, Switzerland.
- Zdhavkovich, M. (1968), "Smoke Observation Of The Wake Of A Group Of Three Cylinders At Low Reynolds Number", J. Fluid Mrch. 32, 339-351.

"Halaman ini sengaja dikosongkan"



LAMPIRAN L=300 mm d= 4 mm

Gambar 2. Silinder Bodi Pengganggu

Gambar 1. Silinder Sirkular (tiga buah)





Gambar 4. Pitot Tube



Gambar 5. Transducer tekanan dan data akuisisi







Gambar 7. Inverter



Gambar 8. Benda uji di test section



BIODATA PENULIS

Nama

: Novi Indah Riani

Tempat / Tanggal Lahir : Jayapura, 17 Nopember 1990

Alamat

Status

Agama

Jenis Kelamin

: Desa Daliwangun RT/RW 001/004 kec. Sugio kab. Lamongan-Jawa Timur : Perempuan : Belum menikah

: Islam

RIWAYAT PENDIDIKAN

(2015) (2013) (2008) (2005) (2002)

Magister Program Studi Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
Pendidikan Teknik Mesin Universitas Negeri Surabaya
Sekolah Menengah Atas Negeri 1 Kedungpring

: Sekolah Menengah Pertama Negeri 2 Sugio

: Sekolah Dasar Negeri Daliwangun