

## Karakteristik Drag pada Lapis Batas Turbulen diatas Pelat Datar Beralur

Sutardi<sup>1)</sup>, M. Ersyad, S. Rijal, dan Eries PZ.

Laboratorium Mekanika Fluida,  
Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS, Surabaya, 60111  
<sup>1)</sup> Email: [sutardi@me.its.ac.id](mailto:sutardi@me.its.ac.id)

### Abstrak

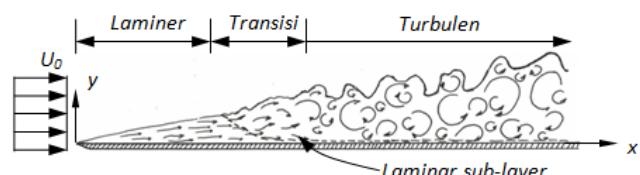
Metode pengurangan gaya drag didalam lapis batas turbulen (*turbulent boundary layer*) pada dasarnya bisa dikelompokkan menjadi dua: metode aktif dan metode pasif. Metode pengurangan gaya drag secara pasif meliputi riblet, *LEBU*, kekasaran secara random, kekasaran permukaan jenis "d" dan "k", dan permukaan bergelombang. Beberapa penelitian terakhir menunjukkan adanya kemungkinan penggabungan beberapa metode pasif tersebut untuk mengurangi gaya drag. Pada studi kali ini hanya dievaluasi kemungkinan adanya pengurangan gaya drag pada modifikasi permukaan datar menggunakan alur yang berorientasi melintang terhadap aliran utama. Kajian eksperimen dilakukan menggunakan wind tunnel dengan angka Reynolds  $\sim 1000$ , berdasarkan kedalaman alur dan kecepatan arus bebas. Dua jenis wind tunnel yang berbeda digunakan didalam studi ini. Untuk pengukuran profil kecepatan, digunakan sebuah wind tunnel dengan ukuran test section sebesar  $90 \times 90$  cm, dengan kecepatan freestream maksimum sebesar 15 m/det. Intensitas turbulen pada centerline wind tunnel ini kurang dari 0.5% untuk semua rentang pengukuran kecepatan freestream. Sementara itu, pengukuran tekanan dilakukan didalam sebuah wind tunnel yang lebih kecil dengan ukuran penampang melintang sebesar  $30 \times 30$  cm dengan kecepatan freestream maksimum kurang lebih 20 m/det. Intensitas turbulen untuk wind tunnel ini sebesar kurang lebih 0.8%. Tiga bentuk alur dievaluasi didalam studi kali ini, yaitu bentuk bujur sangkar (persegi), bentuk "U", dan bentuk "V". Kedalaman dari masing-masing bentuk alur adalah sama, yaitu 10 mm, sementara lebar alur juga 10 mm. Tegangan geser diestimasikan berdasarkan profil kecepatan aliran udara pada permukaan dihilir dari alur, sementara tekanan pada dinding alur diukur menggunakan manometer liquid. Pengukuran profil kecepatan dilakukan menggunakan hot-wire probe tunggal yang operasikan dengan overheat ratio 1.5 dengan menggunakan peralatan dari Dantec Dynamic. Simulasi numerik menggunakan Fluent 6.2 juga dilakukan untuk melengkapi data eksperimen. Hasil eksperimen menunjukkan adanya pengurangan tegangan gesek local. Pengurangan tegangan gesek lokal ini mencapai sekitar 8%, untuk alur berbentuk "U", dibandingkan dengan permukaan tanpa alur. Untuk alur berbentuk bujur sangkar dan "V" menghasilkan penurunan tegangan gesek lokal sebesar masing-masing sekitar 5% dan 7%. Sementara itu, tekanan stagnasi juga mengalami peningkatan untuk ketiga jenis alur, dimana peningkatan tekanan terbesar terjadi untuk kasus alur bujur sangkar. Hasil simulasi numerik juga mengindikasikan adanya peningkatan tekanan, yang ditandai dengan kenaikan koefisien tekanan ( $C_p$ ) dalam order sekitar 0.13.

**Kata Kunci:** Lapis batas turbulen, profil kecepatan, koefisien tegangan gesek ( $C_f$ ), koefisien tekanan ( $C_p$ ), drag

### Pendahuluan

Sifat/perilaku pengembangan lapis batas diatas suatu permukaan sangat berperan terhadap adanya gaya gesek akibat viskositas fluida, yang berakibat timbulnya gaya drag. Perhatikan perkembangan lapis batas diatas sebuah pelat datar misalnya (Gambar 1). Pada saat pertama menyentuh permukaan pelat, lapis batas berkembang secara laminer. Sejalan dengan perkembangannya diatas permukaan pelat, maka lapis batas akan mengalami transisi yang kemudian menjadi lapis batas turbulen sempurna. Seandainya lapis batas tersebut bisa dipertahankan laminer, maka gesekan yang terjadi pada pelat akan lebih kecil dibandingkan dengan bila lapis batas tersebut berhasil menjadi

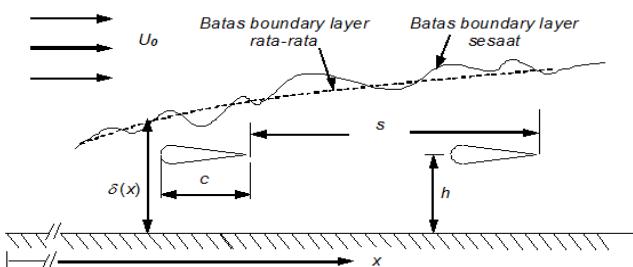
turbulen. Namun demikian, usaha mempertahankan tersebut sangat sulit, sehingga pada kebanyakan kasus didalam praktek keteknikan, lapis batas hampir semuanya turbulen.



**Gambar 1.** Perkembangan lapis batas diatas pelat datar.

Metode pengurangan gaya drag didalam lapis batas turbulen (*turbulent boundary layer*) pada

dasarnya bisa dikelompokkan menjadi dua: metode aktif dan metode pasif. Metode pengurangan gaya drag secara pasif yang sudah dikenal saat ini meliputi riblet, *LEBU's (large eddy break-up devices)*, kekasaran secara random, kekasaran permukaan jenis "d" dan "k", dan permukaan bergelombang. Beberapa penelitian terakhir menunjukkan adanya kemungkinan penggabungan beberapa metode pasif tersebut untuk melakukan pengurangan gaya drag total, yaitu gaya drag akibat gesekan dan akibat tekanan. Gambar 2 menunjukkan diagram skematis pemasangan *LEBU's* didalam lapis batas turbulen. Pengurangan drag dengan *LEBU's* masih meninggalkan masalah, yaitu besarnya tambahan drag akibat penyangga dari struktur *LEBU's* tersebut. Oleh karena itu, metode ini kurang populer saat ini.



**Gambar 2.** Pemasangan *LEBU's* didalam lapis batas turbulen.

Metode pengurangan drag menggunakan kekasaran permukaan kian populer. Hal ini dikarenakan bahwa metode ini tidak perlu tambahan daya dari luar dan memungkinkan untuk dioptimasi dengan penggabungan dengan metode lainnya seperti hembusan atau hisapan. Choi dan Fujisawa (1993) menunjukkan adanya pengurangan drag akibat tegangan geser sebesar kurang lebih 1% untuk permukaan yang dimodifikasi dengan alur persegi yang melintang. Namun demikian mereka belum melibatkan perubahan yang terjadi pada drag akibat tekanan statik pada dinding alur persegi. Ching dan Parsons (1998) berpendapat bahwa bila pengurangan tegangan geser lokal bisa dimaksimalkan, sementara kenaikan tegangan geser sesudah alur bisa diminimalkan, maka pengurangan drag total akan bisa diperoleh. Masih banyak kajian tentang usaha pengurangan drag menggunakan pelat beralur. Namun demikian, sepengatahuan penulis, sampai saat ini masih belum ditemukan tentang bentuk dan ukuran alur yang optimal untuk memperoleh pengurangan drag yang maksimal. Oleh karena itu, kajian tentang pengaruh alur melintang pada pelat datar untuk memperoleh pengurangan drag akibat adanya lapis batas turbulen masih perlu dilakukan.

Tujuan utama dari kajian kali ini ialah untuk mengevaluasi kemungkinan adanya pengurangan gaya drag pada modifikasi permukaan datar menggunakan alur yang berorientasi melintang terhadap aliran utama

dengan melakukan kajian eksperimen didalam wind tunnel. Parameter yang dievaluasi meliputi profil kecepatan, distribusi tegangan geser, dan distribusi tekanan didalam alur. Selain itu, struktur vorteks didalam alur juga dievaluasi.

## Metoda & Fasilitas yang Digunakan

Kajian eksperimen dilakukan menggunakan wind tunnel dengan angka Reynolds sekitar 1000, berdasarkan kedalaman alur dan kecepatan arus bebas. Dua jenis wind tunnel yang berbeda digunakan didalam studi kali ini. Untuk pengukuran profil kecepatan, digunakan sebuah wind tunnel dengan ukuran test section sebesar 90 x 90 cm, dengan kecepatan freestream maksimum sebesar 15 m/det. Intensitas turbulen pada centerline wind tunnel ini kurang dari 0.5% untuk semua rentang pengukuran kecepatan freestream. Detail dari wind tunnel yang digunakan dan alat ukurnya bisa dilihat pada Sutardi (2003). Sementara itu, pengukuran tekanan dilakukan didalam sebuah wind tunnel yang lebih kecil dengan ukuran penampang melintang sebesar 30 x 30 cm dengan kecepatan freestream maksimum kurang lebih 20 m/det. Intensitas turbulen untuk wind tunnel yang kedua ini sebesar kurang lebih 0.8% (Ersyad, 2011; Rijal, 2011; Eries, 2011). Tiga bentuk alur dievaluasi didalam studi kali ini, yaitu bentuk bujur sangkar, bentuk "U", dan bentuk "V" (Gambar 3).

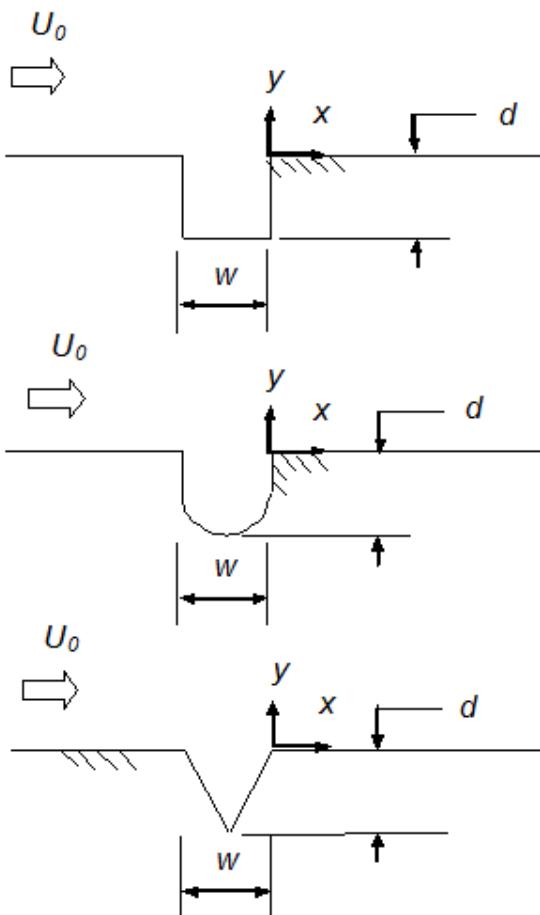
Kedalaman dan lebar dari masing-masing bentuk alur adalah sama, yaitu 10 mm. Tegangan geser diestimasikan berdasarkan profil kecepatan aliran udara pada permukaan dihilir dari alur, sementara tekanan pada dinding alur diukur menggunakan manometer liquid. Pengukuran profil kecepatan dilakukan menggunakan hot-wire probe tunggal yang operasikan dengan overheat ratio 1.5 dengan menggunakan peralatan dari Dantec Dynamic. Simulasi numerik menggunakan Fluent 6.2 juga dilakukan untuk melengkapi data eksperimen. Parameter aliran yang dievaluasi dari data simulasi numerik hanya distribusi tekanan pada dinding alur.

## Hasil dan Pembahasan

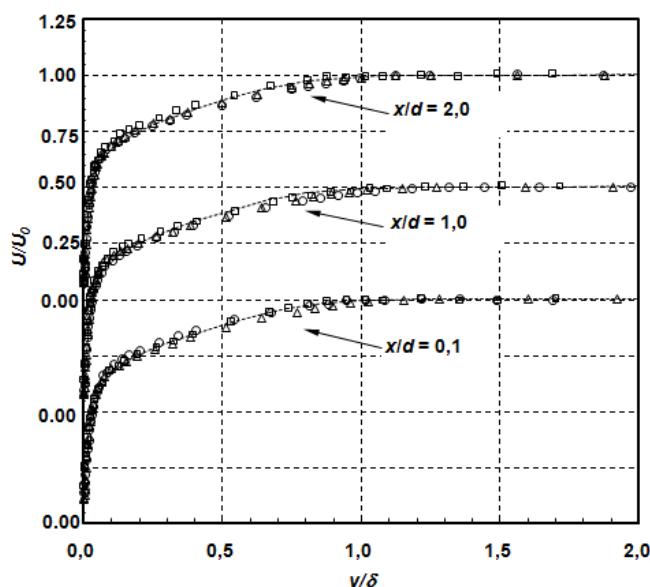
### - Profil Kecepatan

Profil kecepatan diatas pelat ditunjukkan pada gambar 4a dan 4b. Profil kecepatan hanya di-plot untuk tiga lokasi pengukuran yaitu pada  $x = 1\text{mm}$ ,  $10\text{mm}$ , dan  $20\text{mm}$  di hilir dari dinding belakang alur, atau bersesuaian dengan  $x/d = 0,1; 1,0;$  dan  $2,0$ . Gambar 4a di-plot-kan dalam skala linier, baik untuk kecepatan  $U/U_0$ , maupun untuk jarak dari dinding  $y/\delta_0$ , sementara itu, pada gambar 4b ditunjukkan skala yang semi-logaritmik, yaitu linier untuk  $U/U_0$ , dan logaritmik untuk  $y/\delta_0$ . Penge-plot-an dengan metode semi-logaritmik ini dimaksudkan untuk melihat lebih

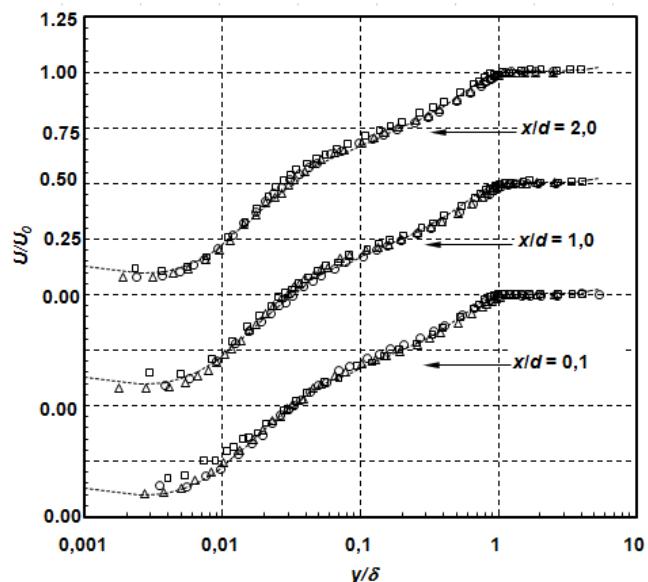
detail distribusi kecepatan di daerah yang sangat dekat dengan dinding. Hal ini akan mengindikasikan tentang pengaruh bentuk alur terhadap struktur lapis batas diatasnya.



**Gambar 3.** Tiga bentuk alur yang digunakan didalam studi: persegi, "U", dan "V".  $w = d = 10\text{mm}$ .



**Gambar 4a.** Distribusi kecepatan di tiga lokasi di hilir dari alur,  $x/d = 0,1$ ;  $1,0$ ; dan  $2,0$ . Simbol:  $\square$ , alur persegi;  $\circ$ , alur "U";  $\triangle$ , alur "V", ---, pelat tanpa alur.



**Gambar 4a.** Distribusi kecepatan di tiga lokasi di hilir dari alur. Keterangan sama dengan gambar 4a.

Pada gambar 4a, kita sulit untuk membedakan antara profil kecepatan pada tiga lokasi yang berbeda dan untuk ketiga bentuk alur yang berbeda. Semua profil kecepatan terlihat menyatu dengan sendirinya (*self-similar*) dalam bentuk parameter-parameter tak berdimensi  $U/U_0$ , sebagai fungsi dari  $y/\delta_0$ . Lain halnya dengan metode "plot" pada gambar 4b. Dengan skala semi-logaritmik ini terlihat dengan jelas pengaruh yang berbeda dari ketiga bentuk alur tersebut dan untuk tiga lokasi  $x/d$  yang berbeda. Dari gambar 4b terlihat bahwa pengaruh terkuat terhadap  $U/U_0$  ialah alur berbentuk persegi. Demikian juga, terlihat dari gambar 4b bahwa semakin jauh dari alur, maka pengaruh alur pun semakin tidak signifikan (lihat pada lokasi  $x/d = 2,0$ ).

#### - Distribusi Koefisien Tegangan Geser ( $C_f$ )

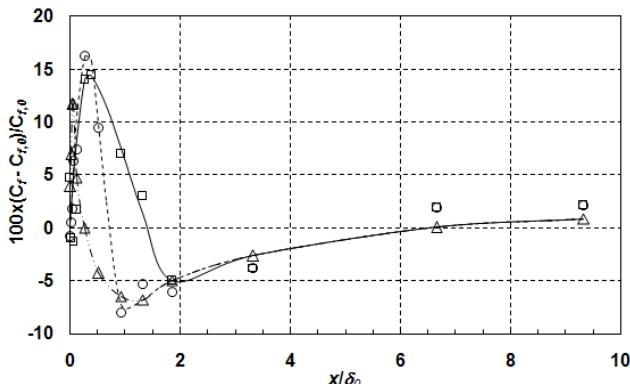
Distribusi tegangan geser pada dinding di hilir dari ketiga bentuk alur ditunjukkan pada gambar 5. Harga  $C_f$  dinormalisasi (di-non-dimensionalkan) dengan nilai  $C_{f0}$ , yaitu nilai  $C_f$  untuk pelat tanpa alur. Harga  $C_f$  diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut:

$$C_f = \frac{\tau_w}{0.5\rho U_0^2}. \quad (1)$$

Nilai  $U_0$  adalah besaran kecepatan pada arus bebas (*freestream*). Tegangan geser dinding ( $\tau_w$ ) pada dinding dihitung berdasarkan gradien kecepatan pada dinding, yaitu menggunakan persamaan (2).

$$\tau_w = \mu \left( \frac{\partial U}{\partial y} \right)_{y=0}. \quad (2)$$

Dari gambar 5 terlihat bahwa ketiga bentuk alur menyebabkan kenaikan  $C_f$  secara lokal sesaat di hilir dari alur. Kenaikan  $C_f$  ini kemudian diikuti dengan pengurangan nilai  $C_f$ , yang kemudian nilai  $C_f$  berangsur menuju kepada nilai  $C_f$  untuk permukaan halus (seperti tanpa alur). Hal ini ditunjukkan dengan harga  $(C_f - C_{f,0})/C_{f,0}$  mendekati harga 0. Kenaikan tegangan gesek lokal ini mencapai maksimum sekitar 16%, untuk alur berbentuk "U", dibandingkan dengan permukaan tanpa alur. Untuk alur berbentuk bujur sangkar dan "V" menghasilkan kenaikan tegangan gesek lokal sebesar masing-masing sekitar 15% dan 12%. Sementara itu, pengurangan tegangan gesek lokal ini mencapai sekitar 8%, untuk alur berbentuk "U", dibandingkan dengan permukaan tanpa alur. Untuk alur berbentuk bujur sangkar dan "V" menghasilkan penurunan tegangan gesek lokal sebesar masing-masing sekitar 5% dan 7%. Kenaikan  $C_f$  secara lokal ini menurut Elavarasan dkk (1996) disinyalir akibat adanya kenaikan tekanan lokal pada dinding alur sisi hilir (*downstream wall*). Sementara itu, pengurangan  $C_f$  lokal ini kemungkinan akibat adanya pelemahan vorteks diatas permukaan yang sebagian dindingnya dihilangkan karena alur (Elavarasan dkk, 1996).



Gambar 5. Distribusi tegangan geser pada dinding di hilir dari ketiga bentuk alur. Simbol:  $\square$ , alur persegi;  $\circ$ , alur "U";  $\triangle$ , alur "V".

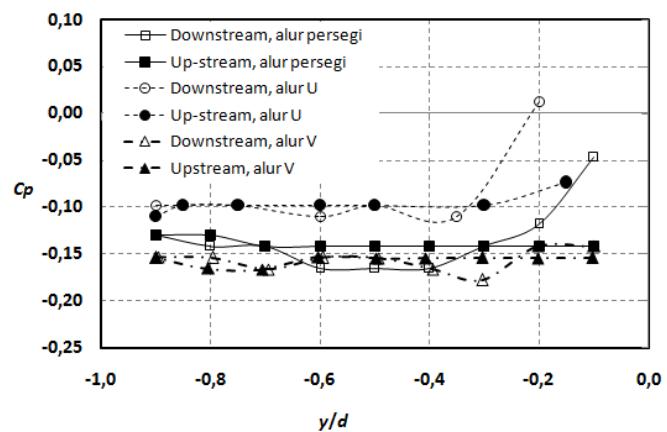
#### - Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Dinding Alur

Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada dinding alur diperoleh baik berdasarkan eksperimen maupun dari data hasil simulasi numerik. Gambar 6a menunjukkan distribusi  $C_p$  pada dinding alur berdasar data eksperimen, sementara pada gambar 6b ditunjukkan distribusi  $C_p$  dari hasil simulasi numerik menggunakan perangkat lunak komersial Fluent 6.2. Nilai  $C_p$  dihitung berdasar pada persamaan (3):

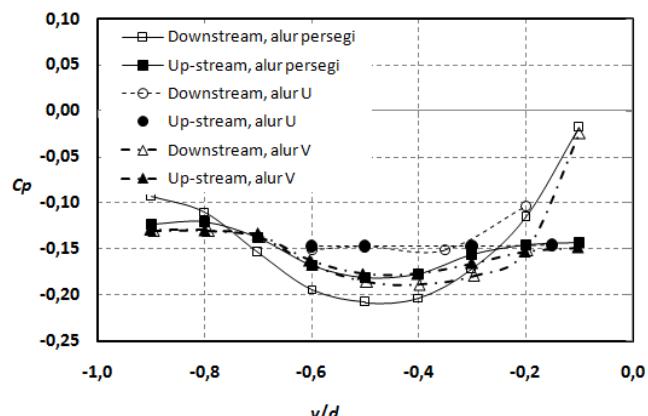
$$C_p = \frac{p - p_\infty}{0.5 \rho U_0^2}. \quad (3)$$

Nilai  $p$  adalah tekanan lokal pada dinding alur,

sementara nilai  $p_\infty$  merupakan tekanan statik pada arus bebas (*freestream*). Meskipun data yang ditunjukkan pada gambar 6a terlihat agak "scatter", konsistensi bahwa tekanan pada dinding alur '*downstream*' lebih besar daripada tekanan pada dinding '*up-stream*' tetap terjaga. Terlebih, tekanan maksimum pada bagian teratas dinding '*downstream*' untuk alur persegi dan alur "U" menunjukkan harga maksimum, dimana hal ini sesuai dengan perkiraan dari Elavarasan dkk (1996). Ke-"scatter"-an data pada gambar 6a sangat dimungkinkan karena keakuratan manometer liquid yang kurang baik. Oleh karena itu, data numerik yang ditunjukkan pada gambar 6b mungkin bisa menjelaskan tentang distribusi tekanan pada dinding alur dengan lebih baik.



Gambar 6a. Distribusi  $C_p$  pada dinding alur berdasar data eksperimen.



Gambar 6b. Distribusi  $C_p$  pada dinding alur berdasar data simulasi numerik.

Gambar 6b bisa menjelaskan sedikit berbeda dengan yang ditunjukkan pada gambar 6a. Pada gambar 6b, terlihat dengan jelas bahwa untuk ketiga bentuk alur, tekanan maksimum terjadi pada bagian teratas dari dinding alur bagian '*downstream*'. Daerah di sekitar tekanan maksimum ini bisa dikatakan sebagai daerah stagnasi. Sebaliknya, beberapa bagian dinding '*downstream*' justru memiliki tekanan yang lebih

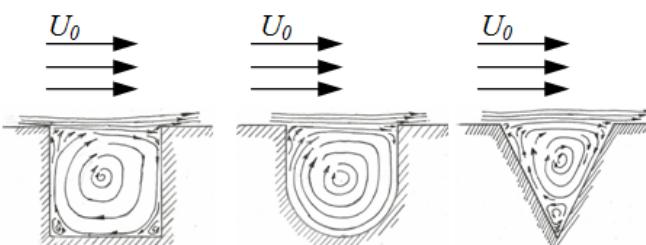
rendah daripada tekanan pada dinding ‘*upstream*’, seperti pada alur persegi dan alur “V”.

Untuk alur “U”, terlihat karakter yang agak unik, yaitu distribusi tekanan yang tidak berbeda yang terlalu signifikan antara pada dinding ‘*upstream*’ dan dinding ‘*downstream*’. Hal ini kemungkinan karena struktur vorteks sekunder yang berbeda dengan yang terjadi pada alur persegi dan alur “V”. Hal ini akan didiskusikan pada bagian berikut.

Hasil simulasi numerik mengindikasikan adanya peningkatan tekanan, yang ditandai dengan kenaikan koefisien tekanan ( $C_p$ ) dalam order sekitar 0,12 – 0,13, yaitu perbedaan antara tekanan pada dinding ‘*downstream*’ dan tekanan pada dinding ‘*upstream*’.

#### - . Stuktur Vorteks didalam Alur

Gambar 7 mengilustrasikan struktur vorteks didalam alur persegi, alur “U”, dan alur “V”. Ilustrasi struktur vorteks tersebut bedasarkan rekonstruksi dari streamline rata-rata yang merupakan hasil studi visualisasi numerik dari penulis. Aliran utama bergerak diatas alur dari kiri ke kanan. Untuk ketiga bentuk alur, terlihat adanya vorteks utama di tengah. Selain vorteks utama tersebut, maka terbentuk pula vorteks-vorteks sekunder di sekelilingnya. Perhatikan vorteks-vorteks sekunder pada sudut-sudut dari alur persegi dan alur “V”. Vorteks-vorteks tersebut terbentuk pada semua sudutnya. Sebaliknya, untuk alur “U”, vorteks sekunder hanya terbentuk pada sudut bagian atas dari alur. Hal inilah yang kemungkinan besar berkontribusi terhadap distribusi tekanan pada dinding alur “U” yang agak berbeda dengan yang terjadi pada dinding alur persegi dan alur “V”.



**Gambar 7.** Struktur Vorteks didalam Alur persegi, alur “U”, dan alur “V”.

## Kesimpulan

Dari studi yang telah dilakukan, maka beberapa kesimpulan dapat dirangkum sebagai berikut.

- 1). Pengaruh alur pada profil kecepatan hanya dirasakan pada daerah yang sangat dekat dengan dinding dan pada jarak yang paling dekat dengan dinding ‘*down stream*’ dari alur.
- 2). Pengaruh yang paling kuat terhadap profil kecepatan ialah alur berbentuk persegi.

3). Tegangan gesek maksimum dan minimum terjadi untuk kasus alur “U”, meskipun masih dalam batas-batas ketidakpastian eksperimen.

- 4). Hasil eksperimen maupun numerik menunjukkan bahwa secara umum tekanan pada dinding ‘*downstream*’ alur lebih tinggi daripada tekanan pada dinding ‘*upstream*’ alur.
- 5). Struktur vorteks didalam alur disinyalir berpengaruh kuat terhadap distribusi tekanan pada dinding alur.

## Nomenklatur

|            |   |
|------------|---|
| $C_f$      | Koefisien tegangan gesek ( $C_f \equiv 2\tau_w / (\rho(U_0)^2)$ tanpa satuan) |
| $C_{f,0}$  | Koefisien tegangan gesek pada pelat tanpa alur (tanpa satuan)                 |
| $C_p$      | Koefisien tekanan (tanpa satuan)  |
| $d$        | Kedalaman alur (m)  |
| $p$        | Tekanan statik lokal ( $\text{N}/\text{m}^2$ )                                |
| $p_\infty$ | Tekanan pada arus bebas ( $\text{N}/\text{m}^2$ )                             |
| $U$        | Kecepatan rata-rata dalam arah $x$ (m/det)                                    |
| $U_0$      | Kecepatan arus bebas ( <i>freestream</i> ) dalam arah $x$ (m/det)             |
| $w$        | Lebar alur (m)  |
| $x$        | Arah absis, diukur dari sisi dinding ‘ <i>downstream</i> ’ alur (m)           |
| $y$        | Arah ordinat (vertikal), diukur dari pelat datar (m)                          |

## Greek letters

|            |  |
|------------|--|
| $\delta$   | Ketebalan lapis batas lokal (m)                  |
| $\delta_0$ | Ketebalan lapis batas sesaat sebelum alur (m)    |
| $\mu$      | Viskositas absolut ( $\text{N.det}/\text{m}^2$ ) |
| $\nu$      | Viskositas kinematik ( $\text{m}^2/\text{det}$ ) |
| $\rho$     | Rapat massa fluida ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )    |
| $\tau_w$   | Tegangan gesek ( $\text{N}/\text{m}^2$ )         |

## Referensi

Ching, C. Y. & Parsons, B. L., Drag characteristics of a turbulent boundary layer over a flat plate with transverse square grooves, *Experiments in Fluids*, Vol. 26, pp. 273-275, (1999).

Choi, K. -S. & Fujisawa, N., Possibility of drag reduction using *d*-type roughness, *Applied Scientific Research*, Vol. 50, pp. 315-324, (1993).

Elavarasan, R., Ching, C. Y., & Antonia, R. A., Turbulent boundary layer over a smooth wall with

widely separated transverse square cavities, *Applied Scientific Research*, Vol. 55, pp. 227-243, (1996).

Eries, P. Z., Studi eksperimen dan numerik karakteristik boundary layer turbulen pada pelat datar beralur bujursangkar tunggal, *Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS, (2011).

Ersyad, M., Studi eksperimen dan numerik karakteristik boundary layer turbulen pada pelat datar beralur “V” tunggal, *Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS, (2011).

Rijal, S., Studi eksperimen dan numerik karakteristik boundary layer turbulen pada pelat datar beralur “U” tunggal, *Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS, (2011).

Sutardi, Effect of different shaped transverse grooves on a zero pressure gradient turbulent boundary layer, *PhD. Dissertation*, Fac. of Engineering and Applied Sciences, Memorial University of Newfoundland, St. John’s, Canada, (2003).