

Separasi dan Reattachment Aliran di Belakang Gundukan (Bump) Setengah Lingkaran, Segitiga dan Persegi Panjang

Setyo Hariyadi S.P. ¹

Setiyo ¹

Supriadi ²

Politeknik Penerbangan Surabaya

1) Program Studi Teknik Pesawat Udara, Politeknik Penerbangan Surabaya

2) Program Studi Teknik Bangunan dan Landasan, Politeknik Penerbangan Surabaya

Jl. Jemur Andayani I/73, Wonocolo, Surabaya 60236

Email: hudzaifahsetyo@gmail.com

Abstract

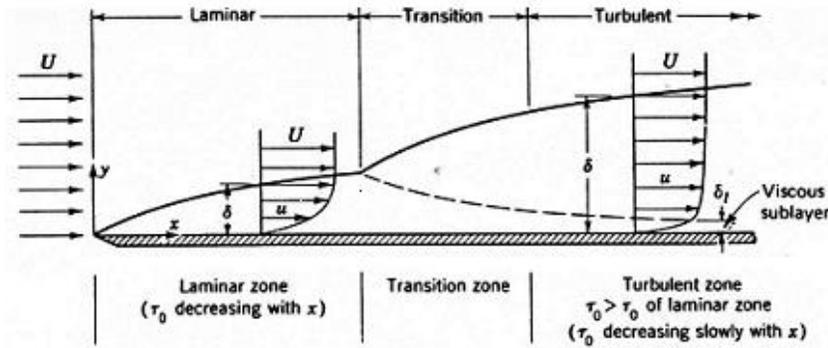
Characteristic of viscous flow through a contour always become the interesting topic to be studied. This research studied characteristic of turbulent viscous flow through a flat plate mounted by bump. Target of this research is to know the flow characteristic through the semicircle, triangle and quadrangular bump, and also to get distribution coefficient of pressure (C_p), separation point, coefficient of pressure drag (C_{Dp}) and coefficient of total drag (C_D). Beside that, in this research also conduct smoke visualization to know visualization of turbulent viscous flow through a flat plate mounted by bump. This experiment is conducted in subsonic wind tunnel. Form of the bump that is used are semicircle, triangle and quadrangular, and free stream velocity equal to 9.75 m/s and 15.5 m/s. Pressure coefficient got from static pressure measurement over flat plate and bump by using wall pressure tap. Coefficient of pressure drag (C_{Dp}) got from calculation based pressure. The measurement of velocity profile over flat plate and bump by using pitot tube. Measurement conducted at 6 point before side of upstream bump, 1 point at top bump and 13 point after side of downstream bump where distance between the points are 20 mm. While for the direction of vertical, the measurement taken at 80 point started from height 80 mm from surface until near the surface. Existence of bump on flat plate result the flow becomes separation so that generate the total drag force addition over flat plate. The highest total drag force occurred on flat plate with triangle bump, then on flat plate with quadrangular bump and the smallest occur on flat plate with semicircle bump.

Keywords: Bump, pressure coefficient (C_p), pressure drag coefficient (C_{Dp}), total drag coefficient (C_D), speed profile, separation point.

PENDAHULUAN

Kemajuan ilmu manusia saat ini terutama dalam bidang mekanika fluida mendorong manusia untuk meneliti aliran fluida yang melintasi suatu benda. Hal ini terjadi karena pada kehidupan sehari-hari manusia tidak terlepas dari aliran fluida, misalnya angin yang melintasi suatu gedung atau bangunan dengan bentuk tertentu. Penelitian-penelitian tentang aliran fluida yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui karakteristik aliran fluida pada saat melintasi suatu benda.

Pada aliran fluida nyata selalu menunjukkan adanya suatu daerah yang alirannya terhambat, yaitu daerah di dekat permukaan yang kecepatan relatif terhadap permukaan bervariasi antara nol hingga 99% kecepatan *freestream*. Daerah yang terhambat ini disebut lapisan batas (*boundary layer*). Konsep lapisan batas ini pertama kali diperkenalkan oleh Ludwig Prandtl dalam tahun 1904. Efek-efek viskositas akan terkonsentrasi dalam lapisan batas ini (*viscous region*) sedangkan di luar lapisan batas efek viskositas dapat diabaikan (*nonviscous region*).

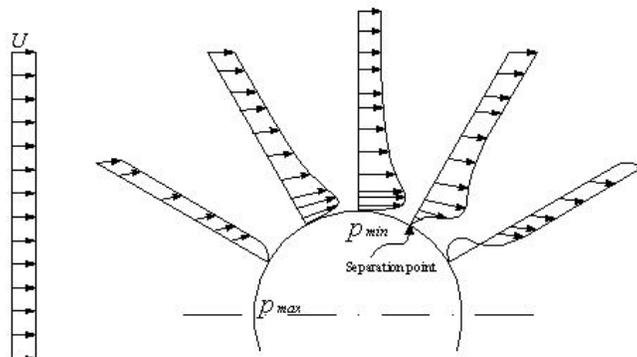


Gambar 1. Lapisan batas laminer dan turbulen sepanjang pelat datar.

Proses pembentukan lapisan batas dapat dilihat pada gambar 1. Ketika aliran melintasi pelat datar, pada bagian depan partikel-partikel fluida yang cukup dekat terhadap pelat dihambat oleh adanya tegangan geser yang besar. Lapisan batas menebal dalam arah yang sama dengan arah aliran. Pada lapisan batas ini terjadi perubahan kecepatan dari nol di permukaan pelat hingga kecepatan mendekati U pada jarak δ .

Lapisan batas dapat dibedakan menjadi dua bagian yaitu lapisan batas laminer dan lapisan batas turbulen yang tergantung pada besarnya harga bilangan *Reynolds*. Di dalam aliran fluida proses peralihan dari aliran laminer ke turbulen disebut sebagai keadaan transisi. Faktor yang mempengaruhi lamanya proses transisi adalah gradien tekanan, kekasaran permukaan, gaya bodi dan gangguan aliran bebas. Begitu lapisan batas mulai menebal, ketidakstabilan pun terjadi dan mengakibatkan percampuran partikel (gerak acak) dan perubahan momentum dalam fluida hingga menyebabkan terbentuknya lapisan batas turbulen. Pada lapisan batas turbulen, profil kecepatan yang terbentuk lebih tebal (bundar) dengan gradien kecepatan di permukaan plat dan tegangan gesernya lebih tinggi daripada kondisi laminer maupun transisi.

Keberadaan *pressure gradient* di sepanjang permukaan benda padat mempunyai pengaruh yang sangat besar dan signifikan terhadap pertumbuhan *boundary layer*. Seperti aliran yang melintasi suatu silinder bulat (gambar 2). Gambar 2 menunjukkan pertumbuhan *boundary layer* pada permukaan silinder bulat yang mana pertumbuhannya lebih banyak dipengaruhi oleh adanya *pressure gradient* akibat bentuk silinder. Pada gambar tersebut tiap titik digambarkan dengan sumbu x searah kecepatan tangensial dan sumbu y yang tegak lurus sumbu x . Dimana U adalah kecepatan fluida ideal diluar *boundary layer*.



Gambar 2. Pertumbuhan *boundary layer* pada silinder bulat

Aliran *viscous* yang melewati *bump* berbentuk segitiga akan mengalami penurunan tekanan di sisi *upstream* dan kenaikan tekanan di sisi *downstream*. Saat momentum aliran fluida tidak dapat melawan kenaikan tekanan dan gesekan dengan permukaan maka aliran fluida akan terseparasi. Titik dimana mulai terjadi gejala separasi disebut titik separasi. Daerah setelah titik separasi mempunyai tekanan yang lebih kecil daripada daerah di sisi *upstream* sehingga mengakibatkan perbedaan tekanan yang besar. Akibat perbedaan tekanan ini maka akan terjadi gaya drag pada benda.

Kecepatan aliran fluida akan mencapai harga nol atau stagnasi di depan silinder, dan seiring dengan pergerakan aliran, kecepatannya akan bertambah besar sehingga mencapai harga maksimum pada bagian atas dari silinder. Setelah mencapai harga maksimum, kecepatan fluida akan berangsur-angsur menurun saat fluida menuju ke daerah buritan (*aft edge*).

Seiring dengan kecepatan aliran fluida, tekanan pada permukaan benda padat juga akan mengalami perubahan yaitu berharga maksimum pada daerah depan dan berharga minimum pada daerah di atas silinder. Seperti yang ditunjukkan gambar 2 *boundary layer* mulai terjadi pada titik stagnasi depan, kemudian seiring dengan pergerakan aliran fluida, *boundary layer* mengalami pertumbuhan dimana ketebalannya akan semakin bertambah.

Pada saat bergerak ke bagian atas dari silinder, aliran fluida akan mengalami penurunan tekanan, atau *pressure gradient* lebih kecil dari nol ($dp/dx < 0$) dan disebut *favourable pressure gradient*. Dengan adanya *favourable pressure gradient* ini aliran fluida yang dekat dengan permukaan bergerak perlahan, dan terjadi kenaikan kecepatan.

Saat aliran fluida mencapai puncak silinder dan mulai bergerak turun ke daerah belakang silinder, aliran fluida akan mengalami kenaikan tekanan. Tekanan ini akan terus naik dan mencapai harga maksimum tepat pada titik separasi dan kemudian tekanannya konstan. *Pressure gradient* yang terjadi mulai dari puncak silinder ke daerah belakang silinder, harganya lebih besar dari nol ($dp/dx > 0$) dan disebut *adverse pressure gradient*. Pada suatu titik dimana aliran tidak sanggup lagi mengatasi *adverse pressure gradient* bersama-sama dengan tegangan geser, maka pada saat itu aliran fluida di dalam *boundary layer* akan mengalami separasi dan titik tersebut dinamakan titik separasi. Di belakang titik separasi, terdapat sebagian fluida yang mengalami aliran balik, dan aliran fluida tidak mengikuti lagi bentuk dari *solid body*. Aliran fluida mulai tidak stabil dan terjadi pergolakan aliran. Daerah dimana terjadi pergolakan aliran disebut *wake*.

Telah banyak penelitian yang berkaitan dengan pengontrolan *boundary layer*. Penelitian yang dilakukan **Andi Joko (2001)** mengenai pengaruh lokasi permukaan kasar sebagai *inlet disturbance* terhadap karakteristik *boundary layer* dan gejala separasi pada pelat melengkung didapatkan bahwa semakin besar jarak permukaan kasar terhadap pelat melengkung maka tingkat turbulensi aliran yang dibangkitkan lebih besar sehingga aliran mempunyai ketahanan yang lebih terhadap terjadinya separasi. Penelitian yang dilakukan **Fatchan Nurul (2000)** mengenai pengaruh *inlet disturbance* terhadap karakteristik *boundary layer* dan gejala separasi pada pelat melengkung didapatkan bahwa semakin besar kekasaran *inlet disturbance* maka tingkat turbulensi aliran yang dibangkitkan lebih besar sehingga aliran mempunyai ketahanan yang lebih terhadap terjadinya separasi. Dari kedua penelitian tersebut juga didapatkan bahwa semakin besar sudut kelengkungan pelat maka separasi akan terjadi lebih awal.

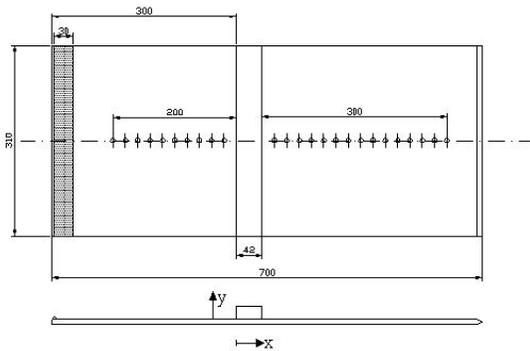
Penelitian tentang pengontrolan *boundary layer* lainnya dilakukan oleh **Ari Susanto (2004)** mengenai karakteristik *turbulent boundary layer* di sekitar alur berbentuk V tunggal yang melintang pada pelat datar. Dari penelitian tersebut didapatkan bahwa akibat adanya alur menyebabkan terjadinya kenaikan total *drag* serta timbul *vortex* quasi stabil dalam alur. Selain itu adanya alur mengakibatkan profil kecepatan turbulen yang terjadi relatif konstan dibandingkan dengan profil kecepatan turbulen yang terjadi pada pelat datar halus. Penelitian yang dilakukan **M. Nuch (2004)** mengenai karakteristik *turbulent boundary layer* setelah *single square groove* pada pelat datar didapatkan bahwa terjadi penurunan C_f total di daerah setelah alur dibandingkan dengan C_f total pada pelat datar halus. Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, maka muncul pemikiran untuk melakukan penelitian tentang aliran melewati *bump* berbentuk segitiga, setengah lingkaran dan segi empat tanpa diberi *inlet disturbance* dengan variasi 2 bilangan *Reynolds*.

METODE

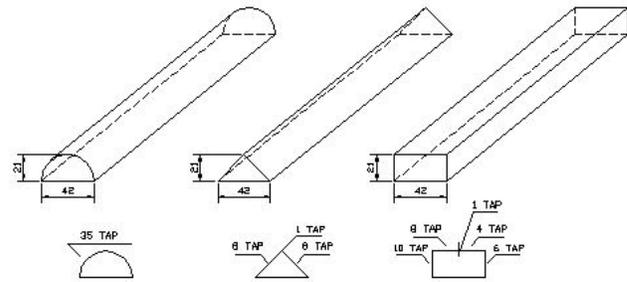
Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik aliran melintasi *bump* berbentuk segitiga meliputi distribusi koefisien tekanan (C_p) sepanjang pelat datar dan *bump*, profil kecepatan sebelum, sesudah dan di atas *bump*, titik separasi, perhitungan koefisien *pressure drag* (C_{Dp}) pada *bump* berdasarkan tekanan, perhitungan koefisien total *drag* (C_D) sepanjang pelat datar berdasarkan perubahan momentum kecepatan sebelum dan sesudah melewati *bump*. Penelitian ini juga bertujuan untuk mendapat gambaran aliran yang melewati *bump* dengan visualisasi menggunakan asap. Variasi bilangan *Reynolds*

yang digunakan yaitu terkait dengan kecepatan freestream 9,75 m/s dan 15,5 m/s. Benda kerja yang digunakan adalah pelat datar yang terdapat gundukan (*bump*) berbentuk segitiga, setengah lingkaran dan segi empat sedangkan detail dari gambar penelitian dapat dilihat pada gambar 3 dan 4.

Wall pressure tube terpasang pada permukaan pelat datar dan *bump* yang digunakan untuk mengukur tekanan statis aliran fluida. Sedangkan total pressure tube digunakan untuk mengukur tekanan stagnasi aliran fluida. Dari kedua tekanan tersebut dengan menggunakan persamaan Bernoulli dapat diperoleh tekanan dinamis aliran fluida. Manometer berfungsi untuk menyatakan besar tekanan yang diukur oleh wall pressure tube dan total pressure tube. Manometer yang digunakan ini mempunyai kemiringan sebesar 30° dengan maksud untuk mempermudah pembacaan Δh terukur. *Wind tunnel* digunakan sebagai tempat pengujian benda uji. Alat ini mempunyai test section berbentuk persegi panjang dengan panjang 45 cm, tinggi 30 cm dan lebar 30 cm. Kecepatan maksimumnya 20 m/s dan intensitas turbulensi sebesar 0.6%.



Gambar 3. Model *bump*



Gambar 4. *Bump* Setengah Lingkaran, Segitiga dan Segi Empat

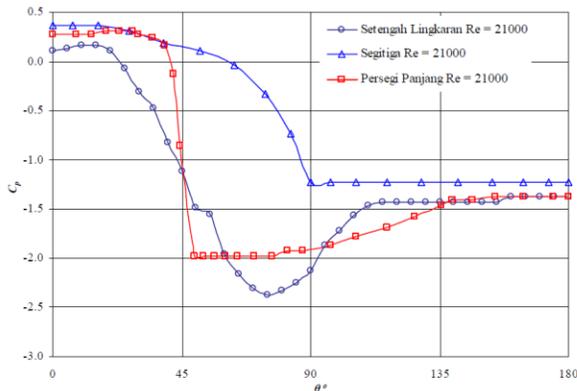
HASIL DAN PEMBAHASAN

Harga Koefisien *Pressure Drag* (C_{Dp})

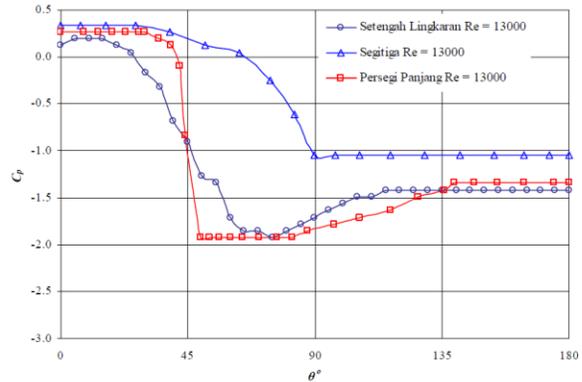
Pada tabel 1 dapat dilihat bahwa harga gaya *drag* pada sisi *upstream bump* setengah lingkaran lebih kecil dibandingkan dengan *bump* segitiga baik untuk $Re = 21000$ ataupun $Re = 13000$. Hal ini dikarenakan pada *bump* setengah lingkaran mempunyai sudut antara garis normal permukaan *bump* dengan arah aliran berubah dari 0° pada awal *bump* menjadi 90° pada puncak *bump*, sedangkan pada *bump* segitiga mempunyai sudut antara garis normal permukaan *bump* dengan arah aliran yang tetap yaitu sebesar 45°. Hal tersebut menyebabkan *streamtube* aliran yang terbentuk di bagian *upstream bump* setengah lingkaran lebih kecil dibandingkan *bump* segitiga sehingga kecepatan aliran yang melewati *upstream bump* setengah lingkaran lebih besar daripada yang melewati *upstream bump* segitiga. Kecepatan yang lebih besar pada *bump* setengah lingkaran berarti distribusi tekanan statis *bump* setengah lingkaran lebih kecil daripada *bump* segitiga (gambar 5(a) dan gambar 5(b)) atau dengan kata lain aliran yang melalui *bump* segitiga menjadi lebih terhambat dibandingkan pada *bump* setengah lingkaran. Gaya *drag* pada sisi *upstream bump* segitiga lebih kecil dibandingkan dengan *bump* persegi panjang baik untuk $Re = 21000$ ataupun $Re = 13000$. Hal ini dikarenakan pada *bump* segitiga mempunyai sudut antara garis normal permukaan *bump* dengan arah aliran yang tetap yaitu sebesar 45°, sedangkan pada *bump* persegi panjang mempunyai sudut antara garis normal permukaan *bump* dengan arah aliran yang tetap yaitu sebesar 90°. Hal tersebut menyebabkan *streamtube* aliran yang terbentuk di bagian *upstream bump* segitiga lebih kecil dibandingkan *bump* persegi panjang sehingga kecepatan aliran yang melewati *upstream bump* segitiga lebih besar daripada yang melewati *upstream bump* persegi panjang. Kecepatan yang lebih besar pada *bump* segitiga berarti distribusi tekanan statis *bump* segitiga lebih rendah daripada *bump* persegi panjang (gambar 5(a) dan gambar 5(b)) atau dengan kata lain aliran yang melalui *bump* persegi panjang menjadi lebih terhambat dibandingkan pada *bump* segitiga.

Tabel 1. Koefisien *pressure drag* (CDp) pada *bump*

BUMP		<i>Upstream</i>	<i>Downstream</i>	<i>Pressure Drag</i>	
		F_{DU}/L	F_{DD}/L	F_{Dp}/L	C_{Dp}
		N/m	N/m	N/m	
Re = 21000	Setengah Lingkaran	-4.791	-7.121	2.330	0.793
	Segitiga	-2.645	-6.553	3.908	1.330
	Persegi Panjang	-2.403	-7.021	4.618	1.571
Re = 13000	Setengah Lingkaran	-1.721	-2.817	1.096	0.942
	Segitiga	-1.003	-2.383	1.379	1.186
	Persegi Panjang	-0.973	-2.728	1.755	1.509



Gambar 5(a) Grafik C_p fungsi θ untuk $Re = 21000$



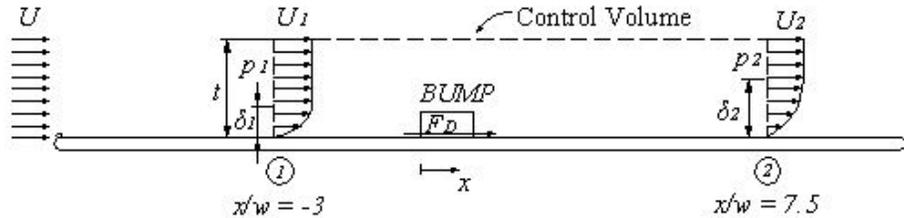
Gambar 5(b) Grafik C_p fungsi θ untuk $Re = 13000$

Daerah separasi banyak berperan pada sisi *downstream bump* sehingga pada sisi *downstream* distribusi tekanan di daerah separasi mempunyai nilai terbesar. Sehingga untuk membandingkan besar gaya *drag* yang bekerja pada masing-masing sisi *downstream bump* cukup dengan membandingkan harga tekanan statis pada daerah separasi. Dari gambar 5(a) dan gambar 5(b) menunjukkan bahwa distribusi tekanan pada *bump* setengah lingkaran lebih kecil dibandingkan pada *bump* persegi panjang untuk $Re = 21000$ ataupun $Re = 13000$, hal ini berarti gaya *drag* pada sisi *downstream bump* setengah lingkaran lebih kecil dibandingkan dengan *bump* persegi panjang untuk kedua harga Re . Dari gambar 5(a) dan gambar 5(b) menunjukkan bahwa distribusi tekanan pada *bump* persegi panjang lebih kecil dibandingkan pada *bump* segitiga untuk $Re = 21000$ ataupun $Re = 13000$, hal ini berarti gaya *drag* pada sisi *downstream bump* persegi panjang lebih kecil dibandingkan dengan *bump* segitiga untuk kedua harga Re .

Gaya *pressure drag* (F_{Dp}) merupakan resultan dari gaya *drag* yang bekerja pada sisi *upstream bump* dengan gaya *drag* yang bekerja pada permukaan sisi *downstream bump*. Pada tabel 1 dapat dilihat bahwa gaya *pressure drag* (F_{Dp}) yang bekerja pada *bump* segitiga lebih kecil dibandingkan pada *bump* persegi panjang untuk $Re = 21000$ maupun $Re = 13000$. Hal ini disebabkan gaya *drag* yang bekerja pada sisi *upstream bump* segitiga lebih kecil daripada *bump* persegi panjang dan gaya *drag* yang bekerja pada sisi *downstream bump* segitiga lebih besar daripada *bump* persegi panjang. Sehingga, resultan gaya *drag* yang bekerja pada *bump* segitiga lebih kecil dibandingkan pada *bump* persegi panjang. Akibat gaya *pressure drag* yang kecil maka koefisien *pressure drag* (C_{Dp}) menjadi kecil. Sedangkan gaya *pressure drag* untuk *bump* setengah lingkaran adalah yang terkecil dibandingkan pada *bump* segitiga dan persegi panjang. Hal ini dikarenakan pada sisi *downstream bump* setengah lingkaran terdapat tekanan statis permukaan *bump* yang lebih besar dibandingkan pada sisi *upstream bump* untuk $Re = 21000$ maupun $Re = 13000$ (lihat gambar 5(a) dan gambar 5(b)). Akibat adanya beberapa tekanan pada sisi *downstream* yang lebih besar daripada sisi *upstream*, maka mengurangi resultan gaya *pressure drag* yang bekerja pada *bump* setengah lingkaran. Hal tersebut tidak terjadi pada *bump* segitiga dan persegi panjang sehingga gaya *pressure drag* pada *bump* setengah lingkaran adalah yang terkecil.

Harga Koefisien Total Drag (C_D)

Harga koefisien total drag (C_D) dihitung dengan menggunakan perubahan momentum aliran sebelum melewati bump dengan momentum aliran setelah melewati bump. Control volume yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 4.6. Control volume persamaan momentum

Gambar 4.13 menunjukkan kontrol volume yang digunakan untuk mendapatkan persamaan momentum. Titik $x/w = 0$ terletak pada awal bump. Titik 1 merupakan inlet aliran yang terletak pada $x/w = -3$ dan titik 2 merupakan outlet aliran yang terletak pada $x/w = 7.5$. U_1 dan U_2 merupakan kecepatan freestream pada masing-masing titik, P_1 dan P_2 merupakan tekanan statis pada masing-masing titik, δ_1 dan δ_2 merupakan tebal boundary layer pada masing-masing titik, t merupakan tebal daerah pengukuran ke arah y dan F_D adalah gaya hambat yang terjadi mulai dari titik 1 sampai titik 2.

Dari hasil penelitian serta proses perhitungan yang telah dilakukan didapatkan harga koefisien total drag (C_D) yang terjadi di atas permukaan pelat datar baik untuk pelat datar dengan bump setengah lingkaran, segitiga maupun persegi panjang. Koefisien drag yang terjadi sepanjang pelat datar merupakan gabungan dari koefisien gesek (C_f) yang terjadi sepanjang permukaan dan koefisien pressure drag (C_{Dp}) yang terjadi akibat adanya bump. Adapun hasil tersebut dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Koefisien total drag (C_D) pada pelat datar

BUMP		C_D	C_{Dp}	C_f
$Re = 21000$	Setengah Lingkaran	0.986	0.793	0.193
	Segitiga	3.022	1.330	1.692
	Persegi Panjang	1.678	1.571	0.107
$Re = 13000$	Setengah Lingkaran	1.136	0.942	0.193
	Segitiga	3.057	1.186	1.870
	Persegi Panjang	1.598	1.509	0.089

Tabel 4.2 menunjukkan harga koefisien total drag (C_D) pada masing-masing bump yang dihitung berdasarkan perubahan momentum dan tekanan statis aliran sebelum melewati bump dengan sesudah daerah separasi. Dari tabel 4.2 diketahui bahwa harga koefisien total drag (C_D) bump setengah lingkaran lebih kecil daripada bump persegi panjang, hal ini dikarenakan aliran yang melewati bump persegi panjang lebih terseparasi daripada aliran yang melewati bump setengah lingkaran sehingga penurunan momentum dan tekanan statis aliran yang melewati bump persegi panjang lebih besar daripada aliran yang melewati bump setengah lingkaran. Sehingga secara keseluruhan mengakibatkan gaya total drag yang diterima pelat datar dengan bump persegi panjang lebih besar daripada pelat datar dengan bump setengah lingkaran. Dari tabel 4.2 juga diketahui bahwa harga koefisien total drag (C_D) bump persegi panjang lebih kecil daripada bump segitiga, hal ini dikarenakan aliran yang melewati bump segitiga lebih terseparasi daripada aliran yang melewati bump persegi panjang sehingga penurunan momentum dan tekanan statis aliran yang melewati bump segitiga lebih besar daripada aliran yang melewati bump persegi panjang. Sehingga secara keseluruhan mengakibatkan gaya total drag yang diterima pelat datar dengan bump segitiga lebih besar daripada pelat datar dengan bump persegi panjang.

PENUTUP

Simpulan

Dari analisa hasil pengujian aliran melintasi pelat datar dengan *bump* berbentuk segitiga dengan kecepatan *freestream* 9.75 m/s dan 15.5 m/s dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Separasi massive pada *bump* setengah lingkaran terjadi akibat momentum aliran tidak mampu mengatasi adverse pressure gradient dan tegangan geser antara permukaan *bump* dengan aliran fluida, sehingga untuk harga Re yang lebih besar akan mengakibatkan letak titik separasi lebih tertunda. Sedangkan pada *bump* segitiga dan *bump* persegi panjang separasi massive terjadi karena adverse pressure gradient yang tajam akibat perubahan sudut yang tajam permukaan *bump*, sehingga letak titik separasi massive tidak dipengaruhi oleh harga Re .
2. Semakin tegak lurus permukaan upstream *bump* dengan arah aliran maka mengakibatkan semakin besar gaya drag yang diterima oleh *bump* tersebut. Sehingga pressure drag untuk *bump* persegi panjang adalah yang terbesar, kemudian *bump* segitiga dan yang terkecil pada *bump* setengah lingkaran.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Andi Joko, 2001, “**Studi Eksperimental Pengaruh Lokasi Permukaan Kasar Sebagai Inlet Disturbance Terhadap Karakteristik Boundary Layer Dan Gejala Separasi Pada Pelat Lengkung**”, Laporan Tugas Akhir, Jurusan Teknik Mesin FTI – ITS.
- [2]. Ari Susanto, 2004, “**Experimental Study of Turbulent Boundary Layer Characteristic Around a Single Transverse “V” Groove on the Flat Plate**”, Laporan Tugas Akhir, Jurusan Teknik Mesin FTI – ITS.
- [3]. Bard Venas and Lars R. Sætran, 1999, *Space-Time Correlations in Separated Flow Behind a Surface Mounted Obstacle*, Department of Mechanics, Thermo and Fluid Dynamics Norwegian University of Science and Technology N-7034 Trondheim, Norway.
- [4]. Fatchan Nurul, 2000, “**Studi Eksperimental Pengaruh Inlet Disturbance Terhadap Karakteristik Boundary Layer Dan Gejala Separasi Pada Pelat Lengkung**”, Laporan Tugas Akhir, Jurusan Teknik Mesin FTI – ITS.
- [5]. Fox, Robert W. and McDonald, Alan T, 1994, *Introduction to Fluid Mechanics*, 4th edition, John Wiley and Son, Inc.
- [6]. M. Nuch, 2004, “**Studi Eksperimental Karakteristik Turbulent Boundary Layer setelah Single Square Groove pada palat datar**”, Laporan Tugas Akhir, Jurusan Teknik Mesin FTI – ITS.