



Studi Numerik Tentang Pengendalian Separasi Aliran di dalam *Conical Diffuser* Menggunakan *Circular Ring Vortex Generator*

Chairunnisa, Sutardi

Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Jl. Arief Rahman Hakim, Sukolilo, Surabaya 60111, Indonesia
E-mail : sutardi@me.its.ac.id

ABSTRAK

Diffuser adalah salah satu bagian yang memegang peranan penting sebagai pendukung proses dalam dunia industri. Parameter utama performa *diffuser* adalah *pressure recovery coefficient* (C_{p_r}). Performa *diffuser* yang rendah diakibatkan oleh separasi aliran karena *adverse pressure gradient* (APG) yang sangat besar dan *effect friction* yang berlebihan. Salah satu upaya untuk mengontrol separasi yaitu menggunakan *circular ring vortex generator*. Peranan *vortex generator* adalah untuk meningkatkan turbulensi aliran agar mampu melawan APG dan *effect friction* yang terjadi sehingga dapat menunda separasi. Penelitian ini dilakukan dengan metode simulasi numerik dengan software CFD. Model turbulensi yang digunakan adalah *standard k-ε* dan jenis *discretization* yang digunakan adalah *second order*. Pada penelitian ini yang divariasikan adalah geometri *diffuser* yaitu *area ratio* pada bilangan *Reynolds* berbasis diameter inlet *diffuser* dan kecepatan aliran pada inlet *diffuser* sebesar $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$ dengan sudut divergensi konstan (2θ) sebesar 30° . Fluida kerja yang digunakan adalah udara. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa dengan menggunakan *vortex generator* separasi aliran di dalam *diffuser* dapat ditunda. Dengan tertundanya separasi, performa *diffuser* meningkat ditandai dengan peningkatan nilai C_{p_r} . Pada $AR = 6$, nilai C_{p_r} meningkat sebesar 16.5% sedangkan pada $AR = 8$, nilai C_{p_r} meningkat sebesar 21.4% untuk $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$.

Kata kunci: CFD, Area ratio, Separasi aliran, Pressure recovery coefficient, Skin friction coefficient.

1. Pendahuluan

Diffuser adalah salah satu alat yang memegang peranan penting sebagai pendukung proses dalam dunia industri. Contoh penggunaan *diffuser* diantaranya pada *Heat Recovery Steam Generator (HRSG)* pada pembangkit listrik PLTGU, *Heating, Ventilating, and Air Conditioning (HVAC) system*, *centrifugal compressor*, *centrifugal pump* yang berada pada sisi luar *impeller*, *jet engine*, serta *wind tunnel*. *Diffuser* dirancang sebagai alat yang dapat mengkonversi energi kinetik menjadi energi potensial dalam bentuk tekanan. *Diffuser* merupakan sebuah saluran tertutup dengan penampang melintang yang membesar sepanjang arah aliran. Separasi aliran mengakibatkan nilai C_p dari *diffuser* menjadi rendah atau bahkan mengalami drop dikarenakan oleh APG yang sangat besar sehingga berdampak pada penurunan performa *diffuser*. Penundaan separasi merupakan suatu cara untuk memperoleh nilai C_p yang maksimum sehingga dapat diperoleh performa *diffuser* yang baik.

Upaya untuk menunda separasi aliran telah banyak dikaji oleh peneliti-peneliti terdahulu. McDonald dan Fox [1] mengevaluasi aliran *incompressible* dalam *conical diffuser* dengan variasi sudut divergensi (2θ) dan *area ratio* (AR) pada *Reynolds number inlet* konstan. Menurut McDonald dan Fox [1], tipe *conical diffuser* dapat didesain untuk *pressure recovery coefficient* yang maksimal dibandingkan tipe *flat walled diffuser* karena tipe ini adalah yang paling memungkinkan untuk tidak terjadi separasi. Sparrow dkk [2] mengevaluasi fenomena separasi pada visualisasi *diverging conical duct* terhadap variasi sudut divergensi dan variasi *Reynolds number*. Pada sudut divergensi sebesar 5° separasi terjadi pada *Reynolds number* rendah ($Re \leq 2000$), sedangkan pada sudut 10° dan 30° separasi terjadi pada semua variasi *Reynolds number*.

Upaya penundaan separasi dengan perlakuan yang berbeda yaitu dengan penambahan *vortex generator*. *Vortex generator* berfungsi membuat aliran menjadi lebih turbulen untuk meningkatkan momentum aliran agar mampu melawan *adverse pressure gradient* dan efek *friction*. Evaluasi *vortex generator* yang diaplikasi pada *conical diffuser* memiliki dampak yang positif dalam meningkatkan performa *diffuser*. Nishi dkk [3] mengkaji distribusi *pressure recovery coefficient* (C_{p_r}) dan *losses coefficient* (k) terhadap *velocity ratio* (VR) pada *conical diffuser* tanpa dan dengan penambahan *vortex generator jet* (VGJ) pada *conical diffuser* dengan sudut divergensi 14° . VGJ merupakan metode penundaan separasi aliran didalam *turbulent boundary layer*. Zhang dkk [4] mengevaluasi *vortex generator* yang berbeda. *Karman vortex generator* (KVG) mengadopsi metode kontrol pasif terhadap separasi aliran. KVG dimodelkan pada *conical diffuser* dengan sudut divergensi (2θ) = 29.14° dan $AR = 3.533$. Bentuk dari KVG berupa *circular ring*. Dengan

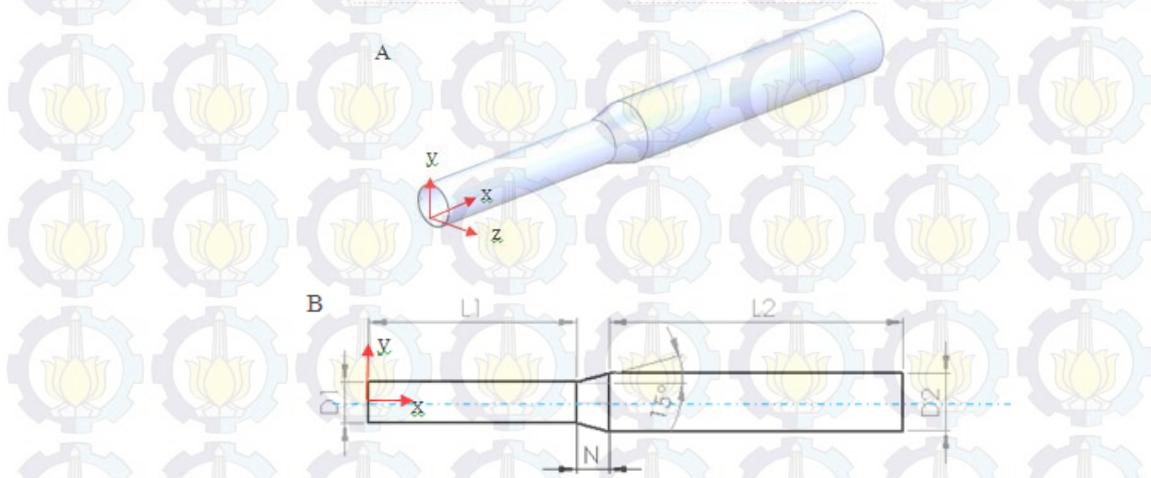
membandingkan metode analisa simulasi *unsteady model* (*URANS*, *DES*, dan *DDES*), variasi dimensi dan lokasi *KVG* didapatkan dimensi, lokasi *KVG* dan metode yang tepat untuk mendapatkan performa *conical diffuser* yang paling baik.

Dalam penelitian ini tipe *diffuser* yang akan diulas secara lengkap berdasarkan hasil evaluasi penelitian diatas yaitu tipe *conical diffuser* tanpa dan dengan pengaruh penambahan *circular ring vortex generator* (*VG*), variasi geometri *conical diffuser*, dan variasi *Reynolds number* di dalam *conical diffuser* pada sudut divergensi konstan (2θ) = 30° menggunakan metode simulasi numerik 3D. Tujuan utama penelitian ini adalah meningkatkan performa *conical diffuser* dengan menunda ataupun mengeliminasi terjadinya separasi yang ditinjau terhadap beberapa aspek, yaitu:

1. Perubahan profil kecepatan
2. Distribusi *pressure coefficient* (C_p),
3. Distribusi *skin friction coefficient* (C_f), dan
4. Visualisasi aliran sekunder berdasarkan vektor kecepatan pada bidang *yz* dan visualisasi aliran kontur tekanan statis, dan kontur kecepatan.

2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan metode numerik dengan *software Computational Fluid Dynamics* (*CFD*). Pada metode numerik ini ada tiga tahapan utama yang harus dilakukan, antara lain: *preprocessing*, *solving* atau *processing* dan *postprocessing*. Geometri dari *conical diffuser* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Geometri *conical diffuser* tanpa penambahan *vortex generator*, (a) tampak luar, (b) tampak samping

Spesifikasi dimensi *diffuser* pada Gambar 1 untuk masing-masing *diffuser* pada penelitian ini dapat diuraikan sebagai berikut.

Conical diffuser (AR) = 6

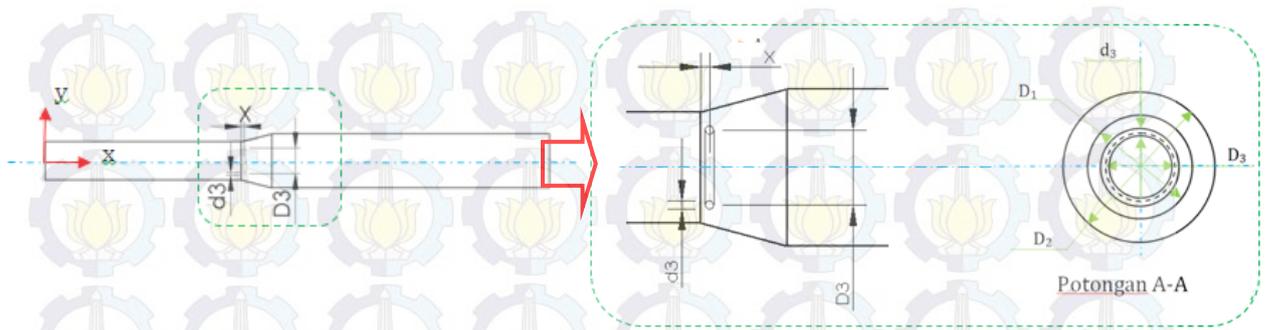
- Panjang *diffuser* (N) : 108.9 mm
- Panjang *upstream channel* (L_1) : 200 mm
- Panjang *downstream channel* (L_2) : 784 mm
- Diameter inlet *diffuser* (D_1) : 40 mm
- Diameter outlet *diffuser* (D_2) : 98 mm
- sudut divergensi (2θ) : 30°

Conical diffuser (AR) = 8

- Panjang *diffuser* (N) : 136.5 mm
- Panjang *downstream channel* (L_2) : 905.6 mm
- Diameter outlet *diffuser* (D_2) : 113.2 mm

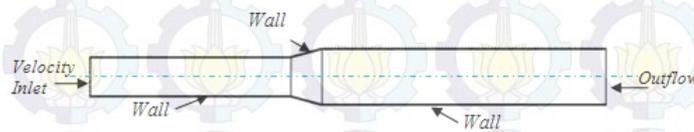
Konfigurasi dari pemasangan *vortex generator* pada penelitian ini dapat diuraikan sebagai berikut dan dapat dilihat pada Gambar 2.

- Terletak setelah inlet *diffuser* di x/N : 0.1
- Diameter *centerline* lingkaran *VG* (D_3/D_1) : 0.75
- Diameter kawat *VG* (d_3/D_3) : 0.1
- Bentuk *vortex generator* yaitu *circular ring vortex generator*

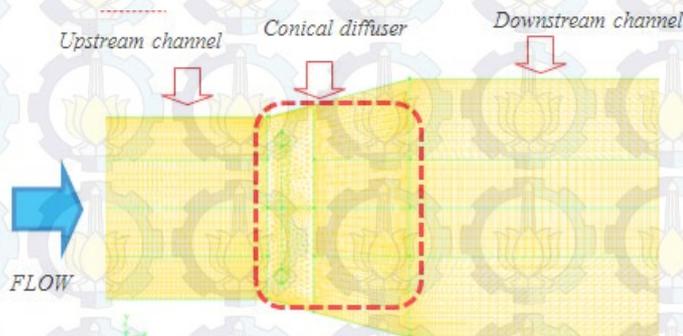


Gambar 2. Konfigurasi *circular ring vortex generator*

Penentuan *boundary condition* dapat dilihat di gambar 3. Volume yang dilalui oleh fluida dibagi menjadi sel-sel (*meshing*) sehingga kondisi batas dan beberapa parameter yang diperlukan dapat diaplikasikan ke dalam elemen-elemen tersebut. Pada pemodelan 3D digunakan *Hexahedral-map*, namun untuk area sekitar *circular ring vortex generator* jenis *meshing* yang digunakan adalah *T-Grid*. *Grid meshing* pemodelan tersebut ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 3. *Boundary condition*



Gambar 4. *Meshing*

Tabel 1. Langkah-langkah dalam metode numerik

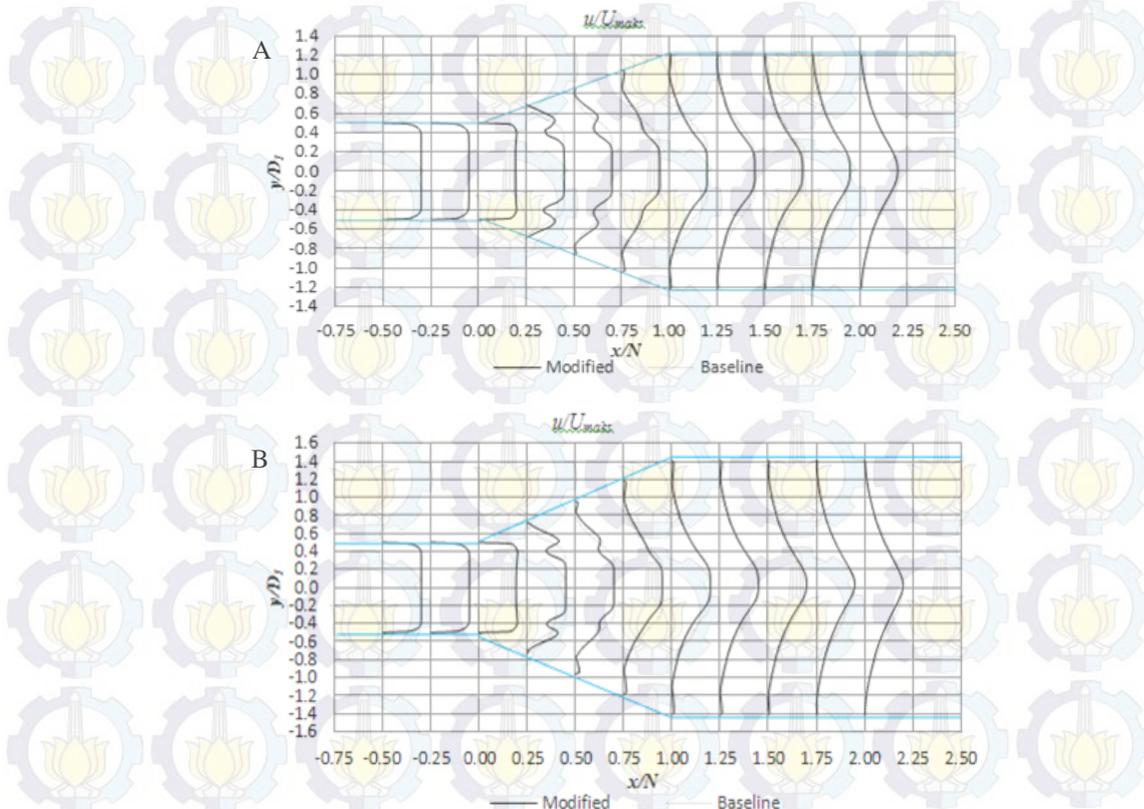
No	Penjelasan
1	<i>Grid</i> . Langkah ini dilakukan dengan mengimport <i>grid</i> yang telah dibuat pada software Gambit (gambar 4)
2	<i>Models</i> . Merupakan pemodelan karakteristik aliran dengan menggunakan standard $k-\epsilon$
3	<i>Materials</i> . Material yang digunakan yaitu udara dengan <i>densitas</i> 1.17 kg/m^3 dan <i>viskositas</i> $1.86 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$
4	<i>Operating Condition</i> yakni sebesar 101325 Pascal
5	<i>Boundary Condition</i> . Kondisi batas <i>inlet</i> adalah <i>velocity inlet</i> sebesar $u = 18 \text{ m/s}$. Kondisi batas <i>vortex generator</i> adalah <i>wall</i> . Kondisi batas <i>outlet</i> adalah <i>outflow</i>
6	<i>Solution</i> . Kriteria <i>konvergensi</i> yang diinginkan dalam pemodelan ini sebesar 10^{-4}
7	<i>Post processing</i> . Merupakan penampilan hasil serta analisa terhadap hasil telah diperoleh

Boundary Condition merupakan penentuan parameter-parameter dan batasan yang mungkin terjadi pada aliran. Pada daerah *inlet* diasumsikan sebagai *velocity inlet* dengan nilai kecepatan sebesar 18 m/s mewakili bilangan *Reynolds* $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$. *Postprocessing* merupakan penampilan hasil serta analisa terhadap hasil yang telah diperoleh berupa distribusi profil kecepatan, kontur kecepatan, distribusi C_p , dan kontur tekanan.

3. Hasil dan Pembahasan

Grid independency dilakukan dengan mensimulasikan beberapa jumlah *cell* dalam *mesh* dengan kondisi batas yang sama. *Grid* terbaik bukanlah *mesh* dengan jumlah *cell* terbanyak, namun ketika dua atau lebih *mesh* menunjukkan perbedaan hasil yang tidak signifikan atau dengan kata lain hasilnya mulai konstan. Hasil *grid independency* menentukan *grid* yang akan digunakan dalam penelitian ini yaitu model yang memiliki jumlah *grid* 170000 *cell*.

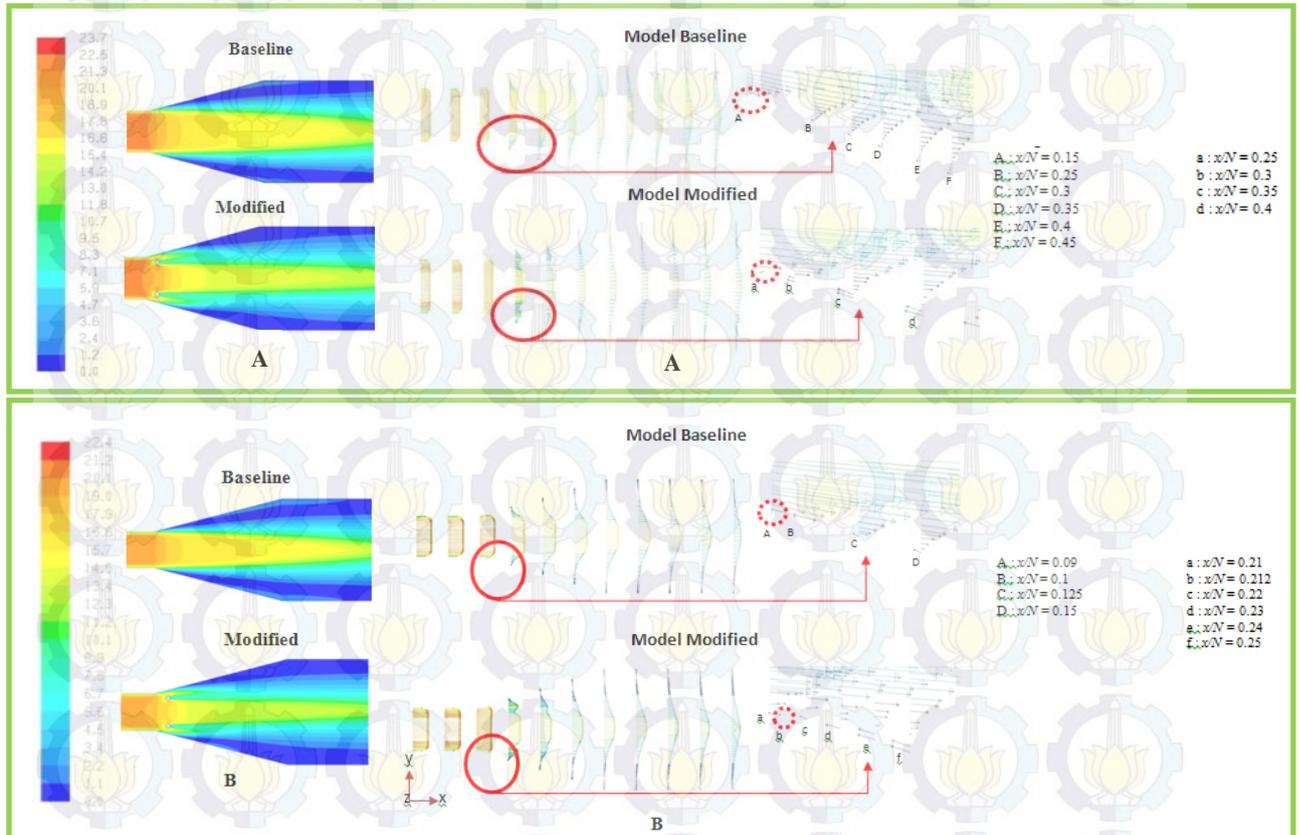
Gambar 5 menunjukkan distribusi profil kecepatan di dalam *conical diffuser* dengan $AR = 6$ dan 8 untuk bilangan *Reynolds* $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$. Profil kecepatan ditunjukkan dalam bentuk grafik diameter tak berdimensi (y/D_1) fungsi kecepatan tak berdimensi (u/U_{maks}) pada jarak tak berdimensi (x/N). u/U_{maks} merupakan perbandingan antara kecepatan lokal pada sebuah *cross section* x/N dengan nilai U_{maks} pada *cross section* tersebut. Dengan demikian pada masing-masing *cross section* x/N nilai maksimum dari u/U_{maks} adalah 1. Profil kecepatan ditunjukkan mulai dari *cross section* $x/N = -0.50$ sampai dengan $x/N = 2.0$. Pada gambar 5 *backflow* akibat separasi belum terlihat dari model *conical diffuser* dengan $AR = 6$ maupun 8.



Gambar 5. Profil Kecepatan di dalam *conical diffuser*: $AR = 6$ (a) dan $AR = 8$ (b) untuk $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$

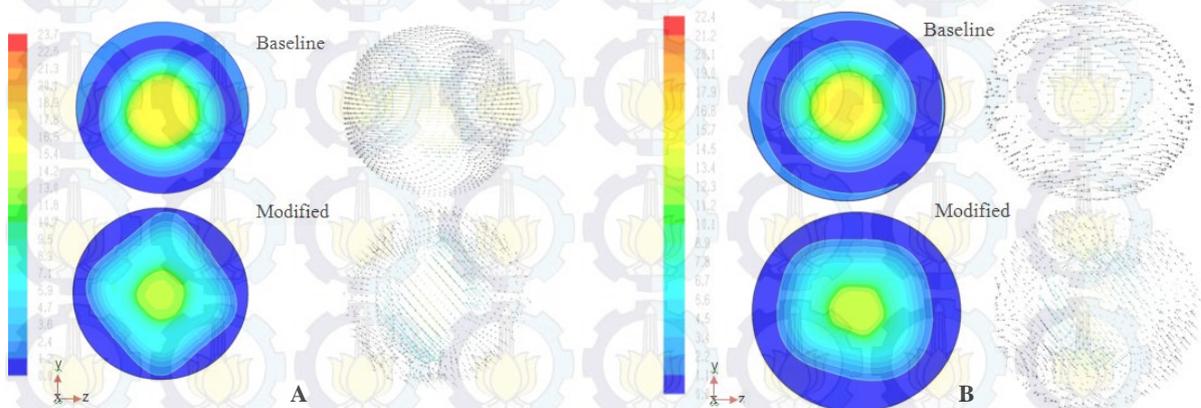
Gambar 6 menunjukkan kontur kecepatan dan vektor kecepatan model *conical diffuser* dengan $AR = 6$ dan 8. Kontur kecepatan menunjukkan tampilan distribusi kecepatan secara keseluruhan pada bagian *midspan* vertikal yang merupakan bidang potong di tengah sumbu z sepanjang sumbu x pada *conical diffuser*. Sedangkan bagian *midspan* horizontal yang merupakan bidang potong di tengah sumbu y tidak ditampilkan karena serupa dengan bagian *midspan* vertikal. Pada sisi *upstream channel* kontur kecepatan berwarna jingga hingga merah yang menunjukkan bahwa kecepatan saat masuk *diffuser* tinggi yaitu $U_{maks} = 23.7$ m/s untuk $AR = 6$ dan $U_{maks} = 22.4$ m/s untuk $AR = 8$. Kemudian aliran memasuki area *diverging wall* yaitu daerah yang mengalami perluasan penampang. Pada daerah ini, harga kecepatan mengalami penurunan secara kontinyu hingga sisi *downstream channel*. Kontur berwarna biru muda menunjukkan nilai kecepatan yang rendah. Kontur kecepatan berwarna biru tua sampai biru muda mengindikasikan adanya *vortex* dengan nilai kecepatan sekitar 0 sampai 4.70 m/s untuk $AR = 6$ dan sekitar 0 sampai 4.50 m/s. Visualisasi vektor kecepatan dapat menjelaskan mengenai fenomena terjadinya separasi aliran. *Back flow* dan separasi dapat diketahui dari vektor kecepatan. Pada gambar tersebut dapat dijelaskan separasi terjadi secara *massive* dan menyebabkan terbentuknya *vortex*. *Vortex* merupakan terjadinya sebuah sirkulasi atau pusaran aliran yang terbentuk antara pertemuan

back flow dengan aliran utama. Perbesaran (*detail*) vektor kecepatan pada gambar tersebut dapat menunjukkan letak titik separasi (*separation point*) dengan lebih detail pada jarak tertentu. Visualisasi vektor kecepatan pada gambar 6 menunjukkan awal terjadinya separasi. Pada *conical diffuser* dengan $AR = 6$, awal terjadinya separasi aliran pada $x/N = 0.150$ untuk model tanpa *vortex generator* dan $x/N = 0.250$ untuk model dengan *vortex generator*. Sedangkan untuk *conical diffuser* dengan $AR = 8$ awal terjadinya separasi aliran pada $x/N = 0.090$ untuk model tanpa *vortex generator* dan $x/N = 0.212$ untuk model dengan *vortex generator*. Dapat dikatakan bahwa *vortex generator* dapat menunda separasi sejauh $\Delta x/N = 13.0\%$ pada *conical diffuser* dengan konfigurasi $AR = 6$ dan $\Delta x/N = 12.2\%$ pada *conical diffuser* dengan konfigurasi $AR = 8$.



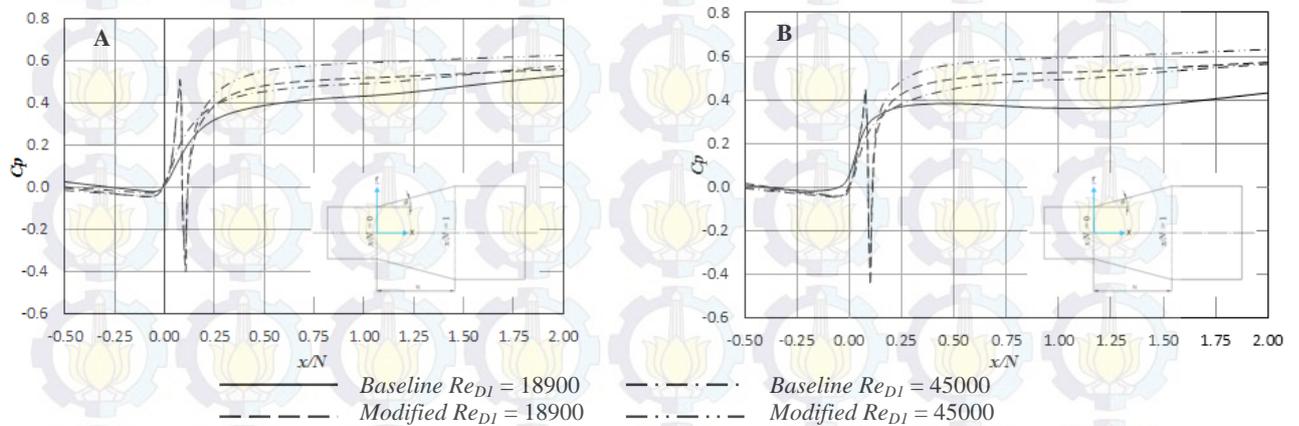
Gambar 6. Visualisasi kecepatan di dalam *conical diffuser*: $AR = 6$ (a) dan $AR = 8$ (b) untuk $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$ (velocity magnitude dalam m/s)

Gambar 7 memvisualisasikan arah aliran sekunder pada $x/N = 0.75$. Tanpa mengaktifkan komponen kecepatan ke arah x (arah aliran utama), aliran sekunder tersebut mengarah sumbu y , ke sumbu z , dan juga ke arah resultan dari sumbu y dan z . Berdasarkan fenomena ini dapat dijelaskan bahwa aliran sekunder memiliki sifat bergerak sirkulasi pada arah yang berlainan dengan arah aliran utama.



Gambar 7. Visualisasi kecepatan di dalam *conical diffuser*: $AR = 6$ (a) dan $AR = 8$ (b) untuk $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$ (velocity magnitude dalam m/s)

Saat akan memasuki *inlet diffuser (straight wall)*, distribusi C_p untuk AR 6 maupun AR 8 mengalami penurunan hingga mencapai harga C_p negatif, seperti yang terlihat pada gambar 8 (*cross section* $x/N = -0.5$ sampai $x/N = 0$). Fenomena ini dipengaruhi oleh adanya penebalan *boundary layer* yang menyebabkan kenaikan nilai U_{maks} seiring bertambahnya jarak, sehingga rentang tersebut tidak lagi menjadi daerah *zero pressure gradient* namun bersifat *favorable pressure gradient (FPG)*. Pengaruh *FPG* inilah yang menyebabkan penurunan nilai C_p . *Conical diffuser model baseline* (tanpa *vortex generator*) dengan $AR = 6$ dan $AR = 8$ memiliki distribusi nilai C_p yang berbeda pada saat masuk *diverging wall* dibandingkan model *modified* (dengan *vortex generator*). Terlihat pada rentang *cross section* dari $x/N = 0$ sampai $x/N = 0.25$, efek pemasangan *vortex generator* pada *cross section* $x/N = 0.1$ menunjukkan adanya kenaikan nilai C_p yang fluktuatif. Kenaikan nilai C_p yang berfluktuatif disebabkan berkurangnya luasan efektif dari *cross section* sehingga terbentuk *vortex*. *Vortex* yang terbentuk oleh adanya *vortex generator* menyebabkan intensitas turbulensi aliran dibelakang *vortex generator* meningkat. Akibat meningkatnya intensitas turbulensi, momentum aliran pada *wall* pun juga mengalami peningkatan. Momentum aliran yang lebih tinggi ini diharapkan mampu untuk melawan *adverse pressure gradient* dan tegangan geser pada *wall diffuser*, sehingga separasi yang terjadi dapat tertunda. Setelah melewati *vortex generator* distribusi C_p terus naik sampai *downstream channel*. Pemasangan *vortex generator* pada AR 6 maupun AR 8 menunjukkan adanya perbaikan performa daripada model *conical diffuser* tanpa *vortex generator* tercantum dalam tabel 2.



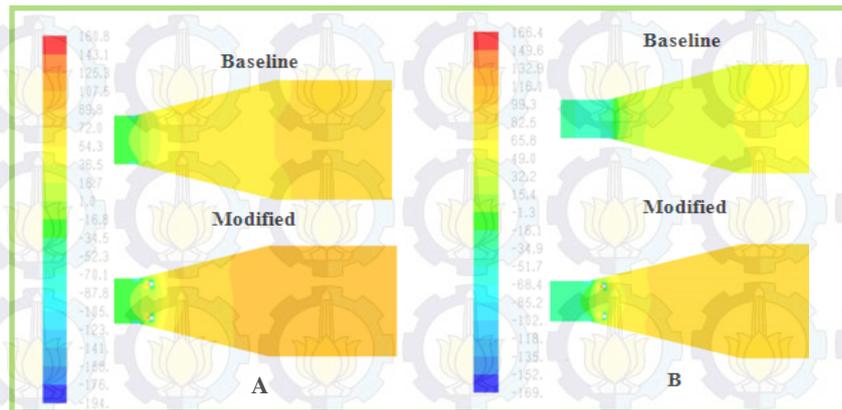
Gambar 8. Perbandingan distribusi koefisien tekanan (C_p) pada *wall*

Tabel 2. Perbandingan nilai C_{pr} dan $C_{p_{maks}}$

Conical diffuser	$Re_{D1} \times 10^{-4}$	Model Baseline		Model Modified	
		C_{pr}	$C_{p_{maks}}$	C_{pr}	$C_{p_{maks}}$
AR = 6	1.89	0.428	0.435	0.513	0.525
	4.5	0.497	0.494	0.595	0.593
AR = 8	1.89	0.486	0.383	0.562	0.525
	4.5	0.495	0.492	0.630	0.592

Tabel 2 menunjukkan peningkatan performa *diffuser* setelah model *conical diffuser* dimodifikasi dengan *circular ring vortex generator*. Untuk $AR = 6$, nilai C_{pr} meningkat sebesar 16.5% untuk $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$, sedangkan $C_{p_{maks}}$ meningkat sebesar 16.7% untuk $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$. Untuk $AR = 8$, nilai C_{pr} meningkat sebesar 21.4% untuk $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$, sedangkan $C_{p_{maks}}$ meningkat sebesar 16.9% untuk $Re_{D1} = 4.5 \times 10^4$.

Gambar 9 menunjukkan kontur tekanan statis di dalam *diffuser* $AR = 6$ dan $AR = 8$. Visualisasi kontur tekanan statis dapat memberikan informasi mengenai perubahan nilai C_p dari *upstream* sampai *downstream channel* yang ditunjukkan oleh gradasi warna yang terbentuk. Kontur tekanan statis pada *inlet diffuser* sisi *diverging* menunjukkan peningkatan nilai C_p secara gradual. Pada daerah setelah *inlet diffuser* untuk *diffuser* dengan *vortex generator* untuk $AR = 6$ maupun $AR = 8$, memiliki nilai C_p yang lebih tinggi daripada model *diffuser* tanpa *vortex generator*. Hal ini menunjukkan adanya perbaikan performa pada model dengan *vortex generator* yang ditandai dengan perubahan gradasi warna ke skala warna yang memiliki nilai lebih besar.



Gambar 9. Kontur tekanan statis *conical diffuser*: $AR = 6$ (a) dan $AR = 8$ (b) untuk $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$ (tekanan statis dalam Pa_{gauge})

4. Kesimpulan

Vortex generator berpengaruh pada penundaan separasi pada model *conical diffuser* dengan $AR = 6$ maupun $AR = 8$. Pada $AR = 6$, separasi tertunda sejauh $\Delta x/N = 13.0\%$ terhadap model baseline. Pada $AR = 8$, separasi tertunda sejauh $\Delta x/N = 12.2\%$ terhadap model baseline untuk $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$. Hal tersebut terjadi karena dengan adanya *vortex generator* dapat meningkatkan turbulensi aliran sehingga aliran menjadi lebih mampu menahan *adverse pressure gradient* dan gaya gesek yang terjadi. *Vortex generator* juga mempengaruhi peningkatan performa *diffuser* berdasarkan peningkatan nilai C_{pr} , sebesar 16.5% pada $AR = 6$ dan 21.4% pada $AR = 8$ untuk bilangan Reynolds $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$.

5. Daftar Pustaka

1. McDonald, A.T., and R.W. Fox, "An Experimental Investigation of Incompressible Flow in Conical Diffuser". International Journal Mechanic Science 8, 1966, page 125 – 139.
2. Sparrow, E.M., J.P. Abraham, and W.J. Minkowycz, "Flow Separation in a Diverging Conical Duct: Effect of Reynolds number and Divergence angle". International Journal of Heat and Mass Transfer 52, 2009, page 3079 – 3083.
3. Nishi, Michihiro, Kouichi Youshida, and Keisuke Morimitsu, "Control of Separation in a Conical Diffuser by Vortex Generator Jets". JSME International Journal 41, 1998, page 233 – 238.
4. Zhang, Yufei, Haixin Chen, and Song FU, "A Karman Vortex Generator for Passive Separation Control in a Conical Diffuser". Science China – Physics, Mechanics, Astronomy 5, 2012, page 828 – 836.