

## PENINGKATAN PERPINDAHAN PANAS TUMBUKAN JET DENGAN MENGIMPLEMENTASIKAN *CONCAVE VORTEX GENERATORS* DALAM SALURAN MELINTANG

\*Hanung Aulia Rahman Budi<sup>1</sup>, Syaiful<sup>2</sup>, Bambang Yunianto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

\*E-mail: hanungarb10@gmail.com

### Abstrak

Aliran melintang yang melewati *impinging jet* dapat mengurangi performa perpindahan panas tumbukan jet. Oleh karena itu, studi ini difokuskan pada pemanfaatan *concave vortex generator* untuk mempertinggi laju perpindahan panas dari permukaan ke aliran. Studi numerik dilakukan dengan aliran jet yang menumbuk permukaan panas di dalam saluran aliran melintang dari jet dengan memasang empat macam VG, yaitu *concave rectangular winglet pair* (CRWP); *concave delta winglet pair* (CDWP); *rectangular winglet pair* (RWP); serta *delta winglet pair* (DWP). Rasio kecepatan antara aliran melintang dan jet divariasikan dari 0.25 sampai 0.38, tinggi VG divariasikan dari  $1/8H$  sampai  $1/2H$  ( $H$  adalah jarak jet ke dinding), serta jarak antara jet dan VG dari  $0d$  sampai  $2d$  ( $d$  adalah diameter lubang jet). Hasilnya menunjukkan bahwa VG mampu meningkatkan performa perpindahan panas tumbukan dalam semua kasus dibandingkan yang dari baseline. Performa perpindahan panas tergantung pada bentuk VG, tinggi VG, serta rasio kecepatan antara jet dan aliran melintang. Peningkatan perpindahan panas berbanding lurus dengan peningkatan tinggi VG dan berbanding terbalik dengan peningkatan jarak antara jet dan VG. Peningkatan area averaged Nusselt number pada kasus *concave rectangular winglet pair* (CRWP) mencapai 85.3% dibanding dengan yang dari baseline pada rasio kecepatan 0.32. Pada semua rasio kecepatan, penggunaan *concave rectangular winglet pair* (CRWP) menunjukkan performa perpindahan panas dan *overall thermal efficiency* tertinggi.

**Kata Kunci:** aliran melintang; peningkatan perpindahan panas; tumbukan jet; *vortex generator* (vg)

### Abstract

*Crossflow that pass through the impinging jet can reduce the impingement heat transfer performance of the jet. Therefore, this study is focused on the use of a concave vortex generator to increase the rate of heat transfer from the surface to the flow. Numerical studies were carried out with the jet flow hitting the hot surface in the crossflow channel of the jet by installing four shapes of VGs, namely concave rectangular winglet pair (CRWP); concave delta winglet pairs (CDWP); rectangular winglet pairs (RWP); and delta winglet pairs (DWP). The velocity ratio between the crossflow and the jet was varied from 0.25 to 0.38, the VG height was varied from  $1/8H$  to  $1/2H$  ( $H$  was the distance of the jet to the wall), and the distance between the jet and VG was varied from  $0d$  to  $2d$  ( $d$  was the diameter of the jet hole). The results show that VG is able to improve the impact heat transfer performance in all cases compared to that from the baseline. The heat transfer performance depends on the shape of the VG, the height of the VG and the velocity ratio between the jet and the crossflow. The increase in heat transfer is directly proportional to the increase in VG height and inversely proportional to the increase in the distance between the jet and VG. The increase in the area of the averaged Nusselt number in the case of the concave rectangular winglet pair (CRWP) reached 85.3% compared to that of the baseline at a velocity ratio of 0.32. At all velocity ratios, the use of concave rectangular winglet pairs (CRWP) showed the highest heat transfer performance and overall thermal efficiency.*

**Keywords:** *crossflow; heat transfer enhancement; jet impingement; vortex generator* (vg)

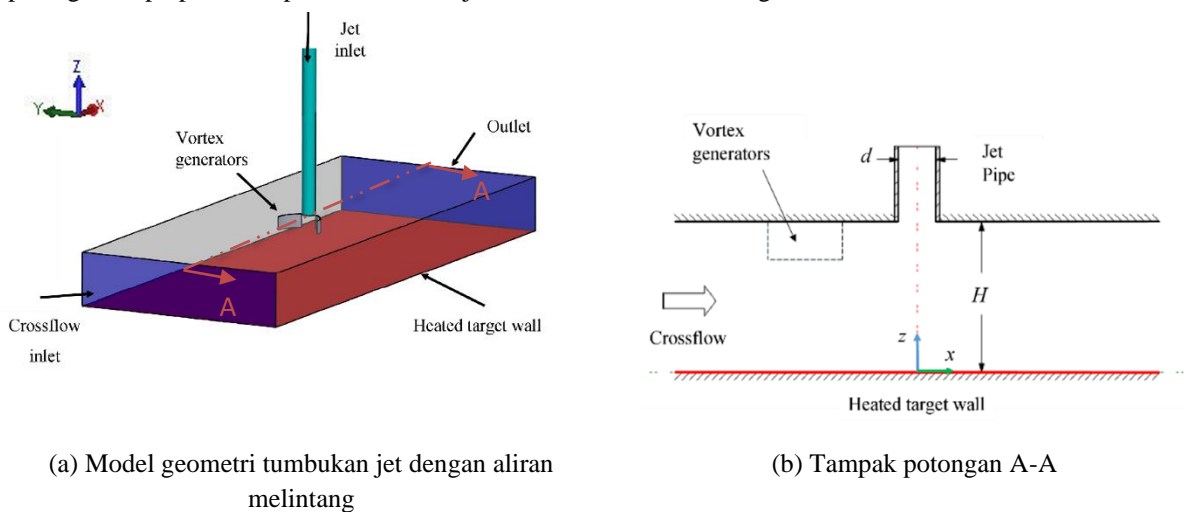
## 1. Pendahuluan

Tumbukan jet sebagai salah satu mekanisme peningkatan perpindahan panas telah banyak digunakan dalam industri, terutama dalam pengeringan, penemperan, dan pendinginan seperti dibahas secara detail oleh Chiriac dan Ortega [1]. Menurut Barbosa et al. [2] tumbukan jet udara terdiri atas aliran jet dari sebuah nozel dengan bentuk dan konfigurasi tertentu yang diarahkan ke permukaan target. Tumbukan jet secara umum banyak digunakan karena efisiensi perpindahan panas yang tinggi dan penggunaannya yang fleksibel [3]. Dalam beberapa tahun terakhir telah dilakukan penelitian untuk meningkatkan perpindahan panas tumbukan jet. Singh et al. [4] menemukan bahwa tumbukan jet dengan aliran berputar-putar (*swirling flows*) dapat meningkatkan perpindahan panas dibandingkan dengan jet silindris konvensional pada konfigurasi jarak jet ke target rendah. Pratap et al. [5] menyatakan bahwa dengan menggunakan nanofluida sebagai fluida kerja untuk tumbukan jet dapat meningkatkan perpindahan panas dibandingkan dengan air.

Pendinginan tumbukan jet sangat sensitif dengan aliran melintang yang berasal dari hulu aliran [6]. Dalam susunan tumbukan jet yang terdiri dari banyak jet, aliran melintang berasal dari aliran jet hulu yang terakumulasi lalu melewati jet hilir, sehingga dapat mengurangi unjuk kerja perpindahan panas [7]. Aliran melintang juga dapat muncul dari jenis aliran bebas seperti yang terjadi pada pendinginan internal sudu turbin gas.

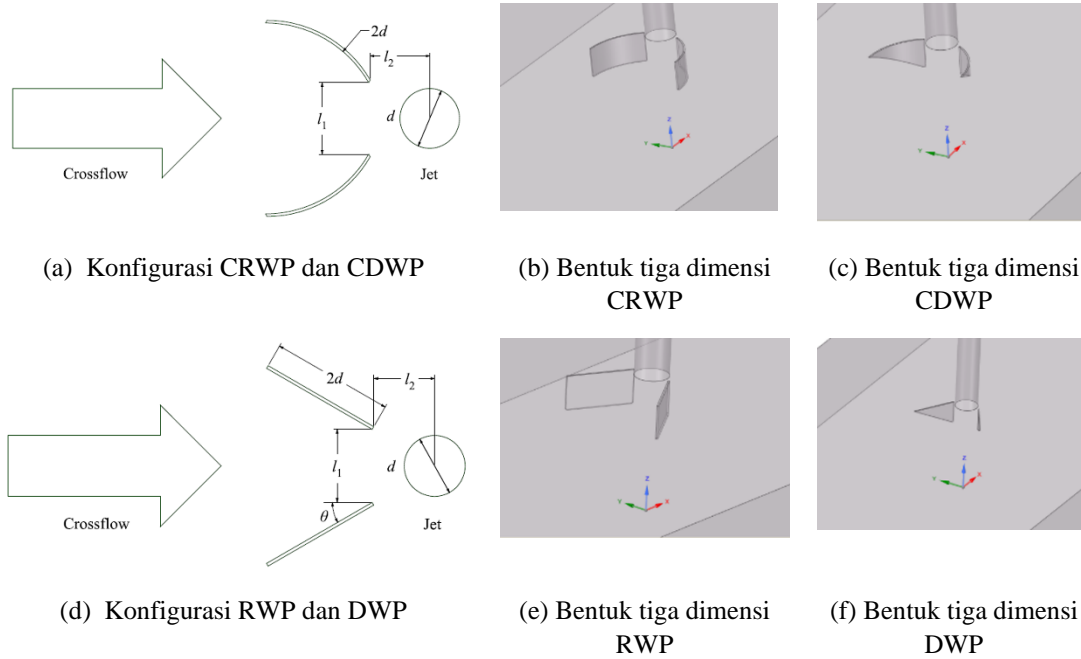
*Vortex Generator* merupakan metode efektif untuk meningkatkan perpindahan panas yang telah menjadi perhatian akhir-akhir ini. Seperti studi oleh Syaiful et al. [8, 9], mereka meneliti efek penggunaan *concave VG* dengan berbagai konfigurasi dan parameter geometri untuk meningkatkan perpindahan panas dari permukaan tube ke aliran udara di dalam sebuah saluran. Sementara itu, penggunaan *vortex generator* untuk meningkatkan perpindahan panas tumbukan masih jarang ditemui. Ada beberapa investigasi sebelumnya yang membahas penggunaan metode ini. Yang et al. [3] telah mencoba untuk mengamati efek konfigurasi penempatan *rectangular winglet pair vortex generator* terhadap performa perpindahan panas. Wang et al. [7, 10] mempelajari efek penggunaan *delta winglet vortex generator pair* dan *rectangular winglet vortex generator pair* terhadap peningkatan perpindahan panas. Mereka mendapati bahwa performa perpindahan panas untuk kasus *rectangular winglet vortex generator pair* adalah tertinggi.

Berdasarkan studi literatur di atas, penggunaan *vortex generator* untuk peningkatan perpindahan panas tumbukan jet dalam aliran melintang adalah masih relatif baru. Oleh karena itu, studi ini difokuskan pada penggunaan *concave vortex generator* untuk meningkatkan perpindahan panas tumbukan jet dalam aliran melintang. Selain itu, kerja ini juga mengamati pola aliran yang terbentuk. Dalam studi ini, efek variasi bentuk VG, jarak antara VG dengan jet, serta tinggi VG terhadap perpindahan panas diinvestigasi. Hasil penelitian ini dapat dipertimbangkan sebagai salah satu pilihan metode peningkatan perpindahan panas tumbukan jet di dalam aliran melintang.



**Gambar 1.** Model komputasi

2.



**Gambar 2.** Geometri VG dan Penempatannya

## Deskripsi Model

### 2.1 Model Komputasi

Model yang dilakukan dalam studi ini dapat ditunjukkan pada Gambar 1. Gambar 1 menginformasikan sebuah pipa jet yang diarahkan ke permukaan dinding target yang dipanaskan, saluran dengan aliran melintang, serta sepasang VG yang terletak di depan aliran jet. Pipa jet mempunyai panjang 200 mm dan diameter ( $d$ ) 2 mm untuk memastikan aliran *fully developed*. Sementara itu, saluran dengan aliran melintang memiliki panjang  $40d$ , lebar  $16d$ , serta tinggi (jarak jet ke target  $H$ )  $4d$ . Pipa jet terletak pada jarak  $20d$  dari inlet saluran aliran melintang. Pada Gambar 1(b), titik koordinat asal terdapat di permukaan dinding target yang dipanaskan tepat di bawah sumbu pipa jet. Sumbu  $x$  adalah searah dengan aliran, sumbu  $y$  adalah tegak lurus bidang dan menjauhi pengamat, dan sumbu  $z$  adalah normal terhadap permukaan target. VG memiliki ketebalan  $0.05d$  dan panjang ( $L$ )  $2d$ . Jarak antara pasangan VG ( $l_1$ ) adalah  $1.2d$ . Serta sudut serang VG ( $\theta$ ) adalah  $30^\circ$ . Studi ini membandingkan empat variasi bentuk VG, yaitu *concave rectangular winglet pair* (CRWP), *rectangular winglet pair* (RWP), *concave delta winglet pair* (CDWP), serta *delta winglet pair*. Gambar 2 (a) sampai (d) menunjukkan geometri VG dan penempatannya. CRWP dan CDWP memiliki jari-jari kelengkungan VG ( $r$ ) sebesar  $2d$ . Sedangkan, RWP dan DWP tidak memiliki kelengkungan VG.

### 2.2. Metode Numerik

Dalam kerja ini, simulasi dilakukan dalam kondisi *steady*. Metode SIMPLE dipilih untuk menyelesaikan korelasi kecepatan dan tekanan. Persamaan kontinuitas, momentum dan energi didiskritisasi menggunakan *second order upwind*. Kriteria konvergensi untuk kontinuitas dan momentum ditentukan 10-5, sedangkan 10-8 untuk energi.

Persamaan pembangun dalam studi ini adalah persamaan kontinuitas, momentum dan energi, seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (1), (2), dan (3). Dalam pemodelan ini, fluida diasumsikan inkompresibel, dan *steady* dengan adanya perpindahan panas dari permukaan target [11].

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i' u_j'} \right] \quad (2)$$

$$\rho u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho \overline{T' u_j'} \right] \quad (3)$$

Pemodelan turbulen yang digunakan adalah SST  $k-\omega$ . Persamaan (4) dan (5) berturut-turut merupakan persamaan energi kinetik turbulen dan laju disipasi spesifik, seperti yang dikemukakan oleh Menter et al. [12,13].

$$u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \overline{P_k} - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (v + \sigma_k v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

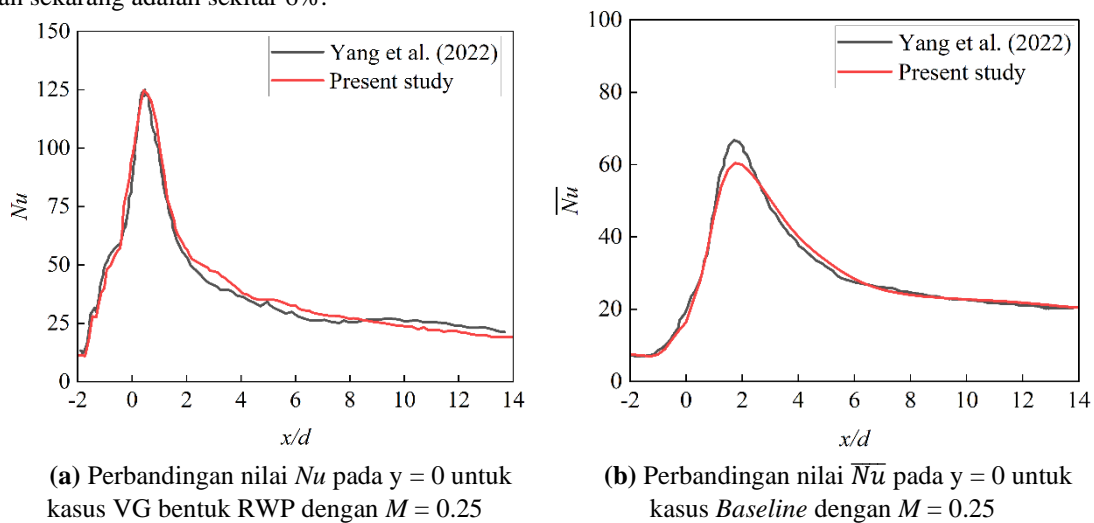
$$u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (v + \sigma_\omega v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \frac{\alpha}{v_t} \overline{P_\omega} - \beta \omega^2 - 2(1 - F_1) \sigma_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (5)$$

### 2.3. Kondisi Batas

Gambar 1 dan 2 menunjukkan model komputasi dari studi ini. Fluida kerja yang digunakan adalah udara dengan mengasumsi masa jenis gas ideal inkompresibel. Bilangan *Reynolds* jet ditentukan pada 10.000 untuk semua kasus. Temperatur inlet jet dan inlet aliran melintang adalah sama, yaitu 300K. Tekanan di outlet ditentukan 0 Pa gauge. Variasi rasio kecepatan antara aliran melintang dan jet adalah berturut-turut 0.25, 0.32, dan 0.38 untuk kecepatan aliran melintang, 20, 25, dan 30 m/det.

### 2.4 Validasi Numerik

Gambar 7 menunjukkan grafik perbandingan nilai  $Nu$  pada  $y = 0$  antara penelitian Yang et al.[3] dengan studi numerik yang dilakukan sekarang. Gambar 3(a) adalah grafik  $Nu$  lokal pada kasus tumbukan jet di dalam aliran melintang dengan adanya RWP VG di depan aliran jet dengan rasio kecepatan  $M = 0.25$ . Sedangkan, Gambar 3(b) adalah grafik bilangan Nusselt rata-rata bentangan ( $\overline{Nu}$ ) pada kasus baseline dengan rasio kecepatan  $M = 0.25$ . Dari Gambar 7 dapat diamati bahwa hasil simulasi sekarang ini adalah bersesuaian dengan perhitungan Yang et al. [3] yang mana error dari pemodelan sekarang adalah sekitar 6%.



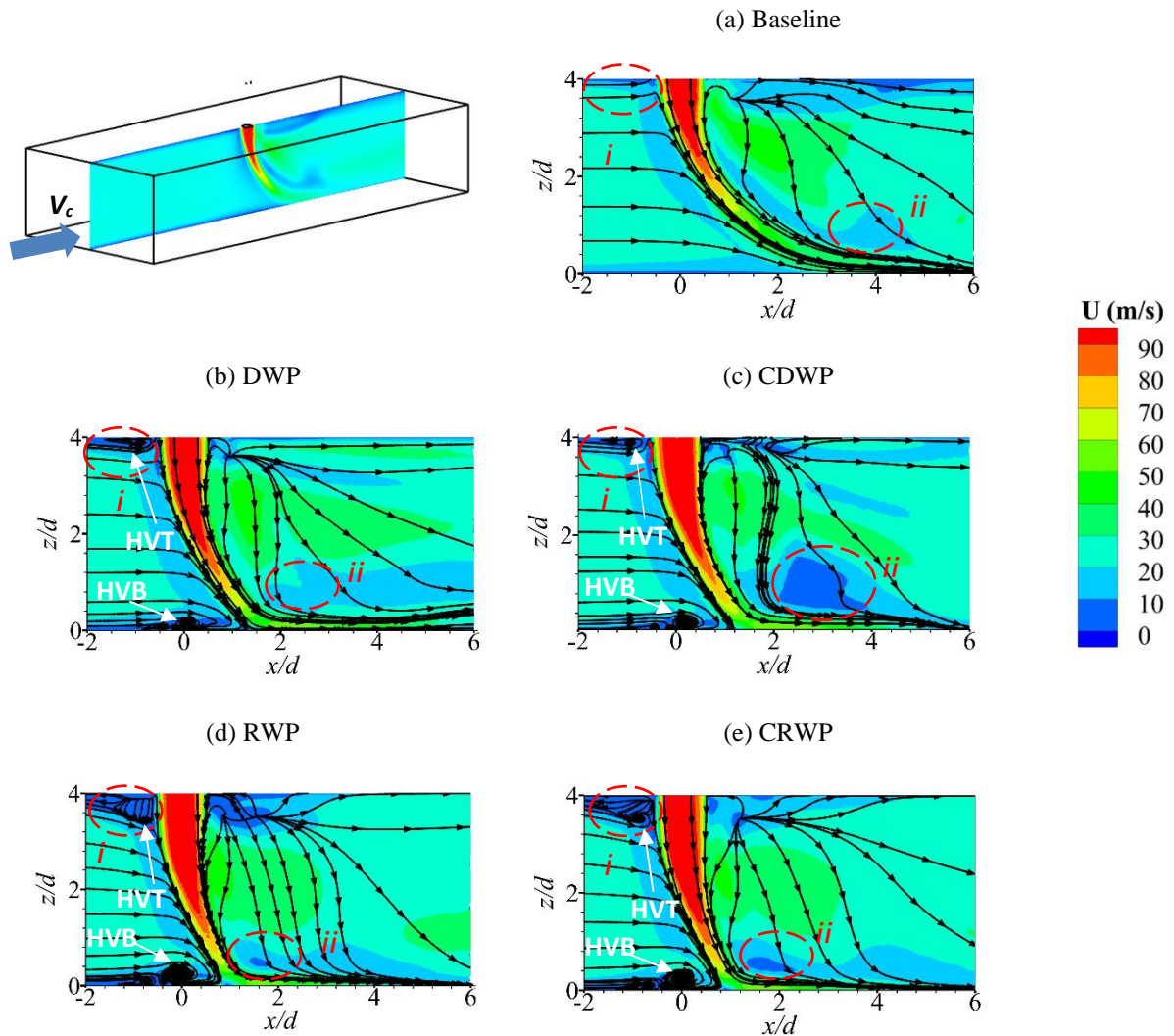
**Gambar 3.** Validasi dengan Yang dkk, 2022

## 3. Hasil dan Diskusi

### 3.1.1. Pola Aliran Empat Macam Variasi Bentuk VG

Gambar 4 memperlihatkan kontur kecepatan dan *streamline* pada  $y = 0d$  untuk berbagai variasi bentuk VG. Dari Gambar 4(a), kasus baseline tidak menunjukkan adanya pembentukan vortex. Aliran melintang mendefleksi aliran jet tanpa hambatan. Sedangkan, penambahan VG cenderung mengurangi defleksi aliran jet dengan pembentukan vortex kecil HVT dan HVB seperti yang diinformasikan pada Gambar 4(b) sampai (e). Vortex HVT dan HVB dapat mengurangi kecepatan aliran melintang di dekat dinding atas dan bawah. Sehingga, penetrasi aliran jet ke dinding target meningkat. Dan lagi, kasus DWP menimbulkan vortex kecil HVT yang muncul di daerah kecepatan rendah  $i$ , seperti yang diperlihatkan oleh Gambar 4(b). Mirip dengan DWP, kasus CDWP juga memiliki vortex kecil HVT di daerah kecepatan

rendah *i* seperti yang ditunjukkan Gambar 4(c). CDWP memiliki daerah kecepatan rendah *ii* yang cukup besar. Adanya daerah *ii* menunjukkan pemusatan kecepatan aliran jet ke arah dinding target. Kasus RWP memiliki daerah kecepatan rendah *i* dan vortex HVT yang lebih besar daripada DWP dan CDWP, seperti yang diinformasikan pada Gambar 4(d). Daerah kecepatan rendah *i* yang besar menunjukkan adanya penghambatan aliran melintang oleh karena adanya interaksi antara aliran melintang dengan vortex HVT yang besar. Sementara itu, kasus CRWP memiliki daerah kecepatan rendah *i* yang besarnya mirip dengan RWP seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4(e). Akan tetapi, CRWP memiliki vortex HVT pada daerah *i* yang sedikit lebih besar dan membulat dibanding RWP. Selain itu, CRWP juga mempunyai daerah kecepatan rendah *ii* yang lebih besar daripada RWP. Sehingga dapat disimpulkan bahwa CRVP VGs dapat meningkatkan perpindahan panas secara lebih baik dibanding bentuk VGs lain pada kasus tumbukan jet dalam aliran melintang.



**Gambar 4.** Kontur kecepatan dan *streamline* pada  $y = 0d$  untuk berbagai bentuk VG ( $M = 0.32$ ).

#### 4. Kesimpulan

Studi numerik tumbukan jet di dalam aliran melintang dilakukan untuk membandingkan pengaruh adanya VGs terhadap pola aliran dan performa perpindahan panas. Kesimpulan dari studi ini adalah sebagai berikut :

1. VGs mengubah pola aliran dengan membangkitkan vortex yang berdampak pada peningkatan perpindahan panas tumbukan jet. Vortex yang dibangkitkan adalah anti-KVP, HVT, dan HVB. Anti-KVP berperan dalam menekan KVP yang berdampak negatif pada perpindahan panas. HVT memiliki efek yang menguntungkan dalam pengurangan kecepatan aliran melintang di dekat lubang jet dan dinding atas. Sementara itu, HVB membantu aliran jet melekat pada permukaan target.
2. CRWP VGs memiliki perpindahan panas tertinggi. Dibandingkan dengan bentuk VGs lain, vortex yang ditimbulkan CRWP VGs adalah jauh lebih panjang dan besar, sehingga peningkatan perpindahan panasnya dapat meningkat secara signifikan. Peningkatan nilai rata-rata bilangan Nusselt terbaik dapat mencapai 87.4% untuk kasus CRWP VGs, dengan koefisien gesekan yang naik tidak lebih dari 16%.

#### Referensi

- [1] Chiriac, Victor A., and Alfonso Ortega. "A numerical study of the unsteady flow and heat transfer in a transitional confined slot jet impinging on an isothermal surface." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45.6 (2002): 1237-1248.
- [2] Barbosa, Flávia V., Senhorinha FCF Teixeira, and José CF Teixeira. "Convection from multiple air jet impingement-A review." *Applied Thermal Engineering* (2022): 119307.
- [3] Yang, Yue, et al. "Numerical investigation of impingement heat transfer on the crossflow channel with vortex generators." *Applied Thermal Engineering* 201 (2022): 117780.
- [4] Singh, Prashant, Youssef Aider, and Inderjot Kaur. "Swirl jet impingement heat transfer: Effect of jet-to-target spacing, jet Reynolds number and orientation with flat target." *International Journal of Thermal Sciences* 184 (2023): 107993.
- [5] Pratap, Aishwary, Yatish Kumar Baghel, and Vivek Kumar Patel. "Effect of impingement height on the enhancement of heat transfer with circular confined jet impingement using nanofluids." *Materials Today: Proceedings* 28 (2020): 1656-1661.
- [6] He, Juan, et al. "Heat transfer enhancement by V-shaped protrusions on jet plate under different crossflow conditions." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 141 (2023): 106597.
- [7] Wang, Chenglong, et al. "Effects of a vortex generator pair on jet impingement heat transfer in cross-flow." *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. Vol. 56727. American Society of Mechanical Engineers, 2015.
- [8] Syaiful et al. "Numerical simulation of heat transfer enhancement from tubes surface to airflow using concave delta winglet vortex generators." *Results in Engineering* 16 (2022): 100710.
- [9] Heriyani, Oktarina, Mohammad Djaeni, and Syaiful. "Perforated concave rectangular winglet pair vortex generators enhance the heat transfer of air flowing through heated tubes inside a channel." *Results in Engineering* 16 (2022): 100705.
- [10] Wang, Chenglong, et al. "Effects of vortex generators on the jet impingement heat transfer at different cross-flow Reynolds numbers." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 96 (2016): 278-286.
- [11] Holzmann, Tobias. "Mathematics, numerics, derivations and OpenFOAM®." *Loeben, Germany: Holzmann CFD* (2016).
- [12] Menter, Florian R., Martin Kuntz, and Robin Langtry. "Ten years of industrial experience with the SST turbulence model." *Turbulence, heat and mass transfer* 4.1 (2003): 625-632.
- [13] Rodriguez, Sal. *Applied Computational Fluid Dynamics and Turbulence Modeling: Practical Tools, Tips and Techniques*. Springer Nature, 2019.