

Kajian Numerik Efektifitas *Film Cooling* pada Sudu Turbin Gas

Agus Jamaldi^{a,*}, Marwan Effendy^{b,**}

^aProgram Studi Magister Teknik Mesin, Sekolah Pascasarjana, Universitas Muhammadiyah Surakarta
Jl. Ahmad Yani, Tromol Pos I Pabelan, Surakarta 57102 Indonesia

^bProgram Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta
Jl. Ahmad Yani, Tromol Pos I Pabelan, Surakarta 57012 Indonesia

*E-mail: agus.jamaldi@gmail.com, **Corresponding Author: Marwan.Effendy@ums.ac.id

Abstract

This numerical study aims to evaluate the performance of trailing-edge (TE) cooling of gas turbine blade. A TE cooling system with staggered pin-fin arrays inside the cooling passage was utilized in the study. Detached Eddy Simulation based on Spallart-Almaras (DES-SA) turbulence model was used to simulate three different setting of blowing ratios (M), i.e. 0.5; 0.8; and 1.1. Three key parameters, i.e. discharge coefficient (C_D), adiabatic film cooling effectiveness (η_{aw}), and shedding frequency (f_s), were used to assess the TE cooling performance to be compared with other available data in open literature. The results showed that all trend predicted data are in good agreement with realistic discrepancies compared to both previous experimental and numerical data, mainly for higher blowing ratio. The discharge coefficient increases slightly with rising blowing ratios. The shedding frequencies are 2043, 2323 and 1976 Hz, representing the characteristic dynamic of mixing process between main hot-gas and coolant gas flow for each blowing ratio from 0.5; 0.8; and 1.1, respectively.

Keywords: discharge coefficient, film cooling effectiveness, shedding frequency, DES-SA

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi penggunaan model turbulensi *Detached Eddy Simulation Spallart-Almaras (DES-SA)* pada studi numerik tentang sistem pendinginan *trailing edge (TE)* pada sudu turbin gas. Sebuah desain *TE cutback cooling* dengan susunan *staggered pin-fin* dipilih sebagai spesimen pengujian berbasis simulasi. Tiga parameter penting seperti *discharge coefficient (C_D)*, *adiabatic film cooling effectiveness (η_{aw})*, dan *shedding frequency (f_s)* menjadi fokus utama dalam penyelidikan kinerja sistem pendinginan *TE* sudu turbin gas. Penelitian dilakukan pada variasi tiga *blowing ratios (M)* yaitu 0,5; 0,8; dan 1,1. Hasil riset menunjukkan bahwa nilai C_D yang diperoleh dari hasil simulasi memiliki kesesuaian trend jika dibandingkan dengan data peneliti terdahulu, dimana nilai C_D sedikit meningkat seiring dengan M yang semakin besar. Penyelidikan terkait η_{aw} yang terjadi pada permukaan *adiabatic wall* menunjukkan bahwa nilainya konsisten dengan data penelitian yang terdahulu, baik secara eksperimen maupun simulasi. Frekuensi aliran vorteks (f_s) berturut-turut 2043, 2323, dan 1976 Hz untuk masing-masing *blowing ratios* 0,5; 0,8; dan 1,1.

Kata kunci: discharge coefficient, film cooling effectiveness, shedding frequency, DES-SA

1. Pendahuluan

Turbin gas telah banyak digunakan secara luas pada dunia otomotif dan industri seperti sistem propulsi pesawat terbang dan kapal laut, tenaga pendorong lokomotif, dan pembangkit listrik. Saat beroperasi turbin gas ini berhubungan langsung dengan beberapa kondisi yang ekstrim, seperti temperatur yang tinggi, gaya aerodinamis yang melewati sudu turbin, keterbatasan kekuatan material (*melting point*), dan tekanan yang tinggi [1][2]. Kondisi ekstrim tersebut menyebabkan kerusakan pada komponen-komponen seperti “*line, vanes, dan blades*” [3][4]. Untuk mengantisipasi terjadinya kerusakan tersebut, maka diperlukan sistem pendinginan untuk menjaga temperatur material berada dibawah “*melting point*” sehingga aman dan menjaga ketahanan pada saat mesin beroperasi [5]. Sistem pendinginan ini bertujuan untuk meminimalisir kerusakan yang terjadi pada komponen turbin gas. Salah satu bagian dari sudu turbin gas yang paling rawan terjadi kerusakan yaitu pada *trailing-edge (TE)*, dimana bagian ini terjadi beban thermal yang tinggi karena beroperasi pada temperatur yang sangat tinggi, dimana pada turbin gas terbaru mencapai temperatur 2000K [2], namun konstruksinya sangat tipis berkaitan dengan kepentingan aerodinamika yang harus dicapainya.

Bagian *TE* sudu turbin menjadi topik yang menarik sejak adanya konflik kepentingan antara keperluan akan sistem pendinginan *TE* dan keharusan desain aerodinamika pada sudu turbin [3][6]. Penelitian terkait sistem pendinginan *TE* sudu turbin telah banyak dilakukan oleh para peneliti sebelumnya baik secara eksperimen maupun secara simulasi [7]. Horbach, dkk.[8] melakukan penelitian secara eksperimen tentang pendinginan *TE* dengan menggunakan perbedaan ketebalan *lip* dan geometri pada *ejection lip*. Hasil penelitian yang didapat yaitu perbedaan ketebalan *lip* sangat berpengaruh terhadap *film cooling* dan nilai *discharge coefficient*. Pendinginan *TE* juga dipengaruhi oleh perbedaan *blowing ratio*, dan terjadi peningkatan koefisien perpindahan panas pada tingkat ketebalan *lip* yang paling rendah. Eksperimen yang lain dilakukan oleh Zifeng Yang, dkk.[9] yang melakukan evaluasi *film cooling effectiveness* dengan menggunakan teknik *pressure sensitive paint (PSP)* untuk menginvestigasi perkembangan aliran turbulen dan struktur

pusaran yang terjadi pada daerah *slot exit* sudu turbin. Hasil penelitian menunjukkan percampuran antara aliran utama dengan aliran pendingin dan distribusi *adiabatic film cooling effectiveness*.

Penelitian secara simulasi juga telah banyak dilakukan oleh peneliti sebelumnya dengan berbagai macam metode/model turbulensi yang berbeda [10][11]. Beberapa model turbulensi yang banyak digunakan dalam menginvestigasi kinerja pendinginan sudu turbin gas antara lain *steady Reynolds Average Navier Stoke (RANS)*, *unsteady RANS*, *Detached Eddy Simulation (DES)*, dan *Large Eddy Simulation (LES)*. Effendy, dkk. [12] melakukan investigasi *film cooling* pada sudu turbin yang dipengaruhi oleh perbedaan ketebalan *lip* dengan menggunakan model turbulensi *DES SST k- ω* . Viswanathan, dkk.[13] melakukan penelitian secara simulasi menggunakan model turbulensi *DES* untuk memprediksi perpindahan panas pada *internal cooling channel*. Model turbulensi *DES* memberikan hasil prediksi yang lebih baik terkait dengan aliran turbulen dan perpindahan panas yang terjadi pada *internal cooling channel* dibandingkan dengan menggunakan model *unsteady RANS*. Penelitian lainnya yang identik yaitu dilakukan oleh Jung-ho Choi [14] dengan model turbulensi yang digunakan yaitu *steady RANS* dan *unsteady DES* dengan parameter yang diamati yaitu *film cooling* dan perpindahan panas pada *TE* yang dipengaruhi oleh adanya penghalang internal, perbedaan geometri lebar *slot*, ketebalan *pressure side* dan perbedaan jumlah aliran masa udara pendingin yang melewati sudu turbin. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Chang-yue, dkk.[15] mengungkap metode *LES* mampu memberikan hasil prediksi yang baik pada aliran turbulen yang melewati sebuah silinder dibandingkan dengan metode *URANS*. Sejak tahun 2010, Effendy, dkk.[16] telah melakukan penelitian dengan pendekatan numerik menggunakan *steady* dan *unsteady RANS*. Penelitian yang dilakukan membahas penggunaan metode turbulensi *DES* dalam memprediksi kinerja pendinginan *TE cutback* pada sudu turbin gas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model turbulensi *DES* memberikan prediksi yang baik dan konsisten dengan data hasil eksperimen maupun simulasi terkait kinerja sistem pendinginan *TE* sudu turbin gas. Mengacu dari peneliti yang dilakukan oleh Effendy, dkk.[16] tersebut, maka pada penelitian ini dilakukan studi pendekatan secara numerik sistem pendinginan pada *TE* sudu turbin gas dengan metode *DES Spalart-Allmaras (SA)* dengan parameter penting yang diinvestigasi seperti *discharge coefficient (C_D)*, *adiabatic film cooling effectiveness (η_{aw})*, dan *shedding frequency (f_s)*. Selanjutnya hasil penelitian yang didapat dibandingkan dengan data referensi dari hasil penelitian terdahulu.

2. Metode Penelitian

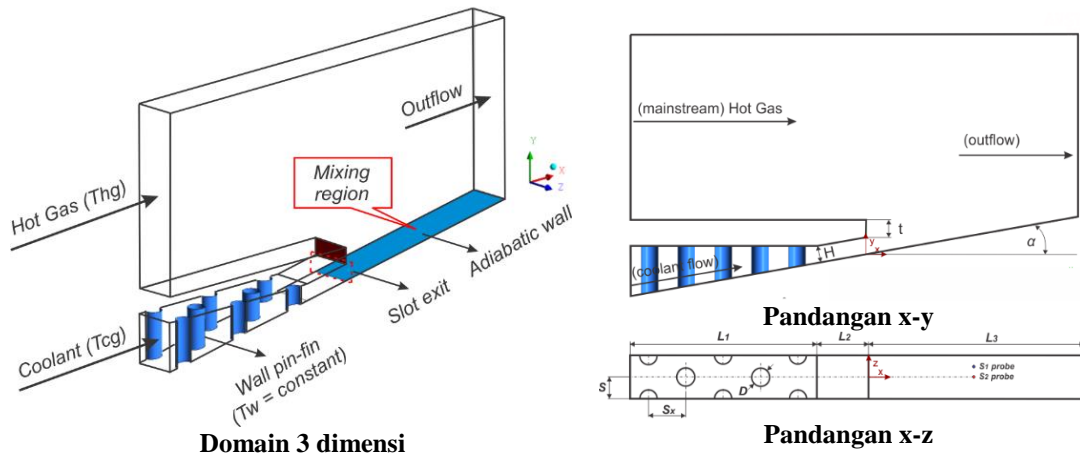
Proses penelitian ini diawali dengan pembuatan desain 3-D untuk memodelkan model eksperimen yang dilakukan oleh Martini, dkk.[17] dengan kondisi eksperimen yang dapat dilihat pada tabel 1. Geometri dari spesimen uji dan *meshing* yang digunakan pada proses simulasi mengadopsi dari penelitian yang telah dilakukan oleh Effendy, dkk. [16] seperti terlihat pada tabel 2. Gambar 1 menampilkan domain komputasi disertai dengan kondisi batas aliran. Bagian *cooling slot* memiliki lebar 12 mm dengan jarak *pitch (S)* 12 mm, pada lorong pendingin terdapat 5 baris susunan *pin-fins* di zona *L₁* dengan sudut kemiringan ($\alpha=10^\circ$). Diameter *pin-fin (D)* dan tinggi *cooling-slot (H)* memiliki dimensi yang sama, yaitu 4,8 mm. Jarak *pin-fin* ke arah *spanwise (S)* adalah 2.5D dan jarak ke arah *streamwise (S_x)* adalah 2.167D, sehingga membentuk *equilateral triangles*. Semua geometri dan kondisi batasnya mengacu pada konsorsium manufaktur turbin gas agar sesuai dengan aplikasi di dunia *engineering*. Untuk *meshing* spesimen uji dapat dilihat pada gambar 2.

Tabel 1. Kondisi eksperimen Martini, dkk.

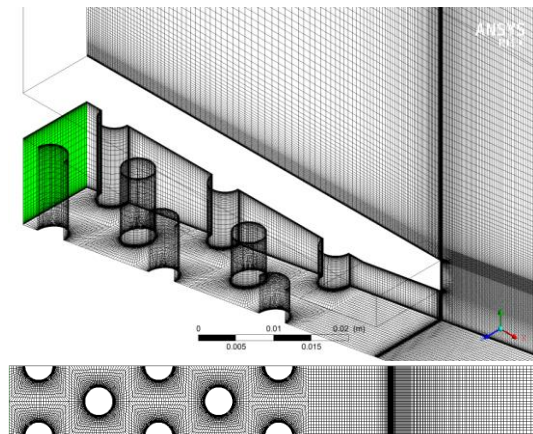
Mainstream flow	Coolant flow
$Re_{hg} = 250.000$	$T_{c, L2\ exit} = 295 - 330\ K$
$Ma_{hg} = 0,125$	$T_{c, L1\ inlet} = 293\ K$
$u_{hg} = 56\ m/s$	$Tu_c = 5\%$
$Tu_{hg} = 7\%$	$M = 0,2 - 1,25$
$T_{hg} = 500\ K$	
$P_{hg} = 105\ kPa$	

Tabel 2. Geometri domain simulasi

Dimensi	Ukuran (dalam mm)
L1	52
L2	14,4
L3	60
S	12
Sx	10,4
t	4,8
H	4,8
D	4,8
α	10°



Gambar 1. Spesimen uji



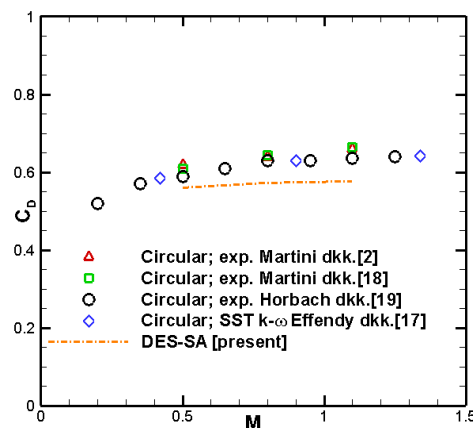
Gambar 2. Meshing

3. Hasil dan Pembahasan

Simulasi sistem pendinginan *TE* pada sudu turbin gas dengan mengaplikasikan model turbulensi *DES-SA* telah berhasil mengidentifikasi *discharge coefficient* (C_D), *adiabatic film cooling effectiveness* (η_{aw}), dan *shedding frequency* (f_s), sebagai tolak ukur kinerja pendinginannya. Ketiga parameter tersebut dapat diuraikan sebagai berikut.

3.1 Discharge coefficient (C_D)

Gambar 3 menunjukkan nilai prediksi data C_D dengan mengaplikasikan model turbulensi *DES-SA* dibandingkan dengan hasil penelitian terdahulu. Nilai prediksi C_D dalam simulasi ini sesuai dengan data eksperimen yang dilakukan oleh peneliti lain [16][17][18], meskipun secara realistis nilainya sedikit di bawahnya. Nilai C_D sedikit meningkat pada kisaran 0,56 – 0,58 seiring dengan bertambahnya angka *blowing ratio* (M).



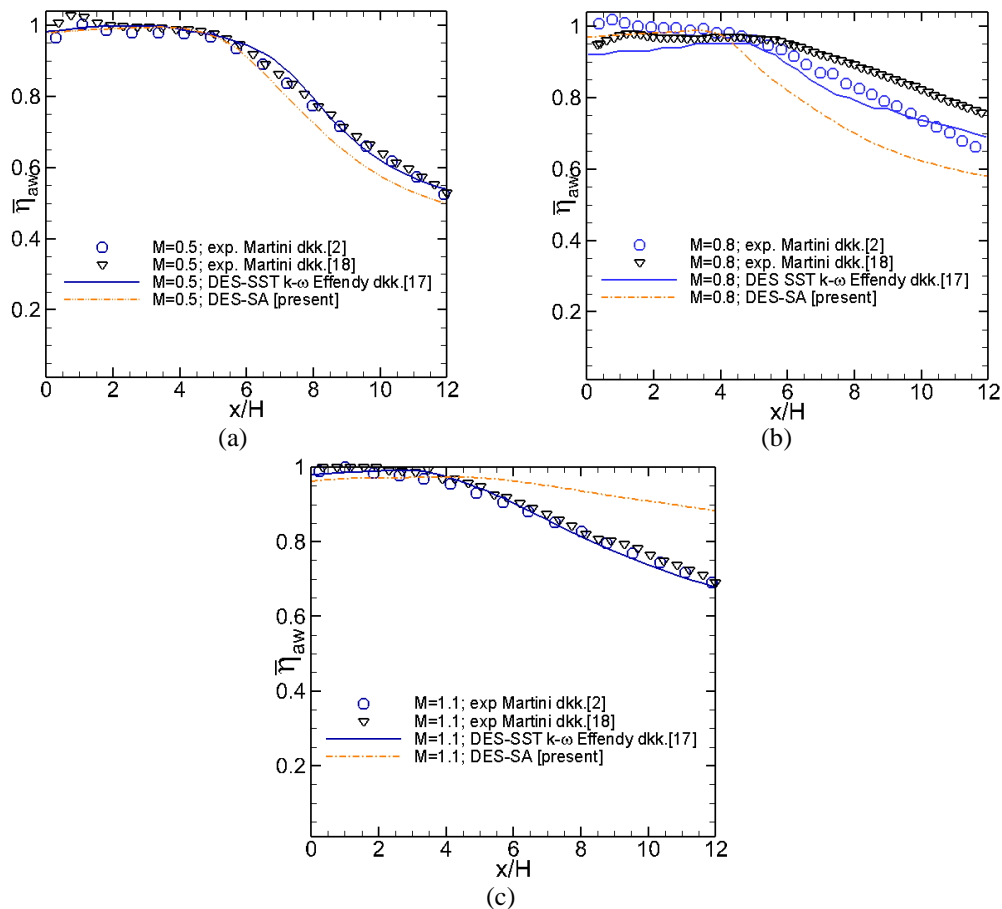
Gambar 3. Discharge coefficient

3.2 Adiabatic film cooling effectiveness (η_{aw})

Gambar 4 menampilkan prediksi data η_{aw} yang terjadi pada *adiabatic/protected wall* pada tiga *blowing ratio* yang berbeda. Gambar 4(a) menampilkan η_{aw} hasil simulasi pada $M = 0,5$. Hasil simulasi konsisten dengan data eksperimen yang dilakukan oleh Martini, dkk.[17][2] dan Effendy, dkk.[16], dimana perbedaan hasil simulasi dengan data peneliti yang lain sebesar 4,7%.

Hasil simulasi pada $M = 0,8$ ditampilkan pada gambar 4(b). “*under-prediction*” terjadi pada posisi $x/H > 4$ yang disebabkan karena fenomena pencampuran antara gas panas dan gas dingin di belakang *slot exit* gas panas lebih mendominasi terhadap distribusi temperatur yang berada di permukaan *adiabatic/protected wall*, sehingga berpengaruh terhadap nilai η_{aw} yang dihasilkan.

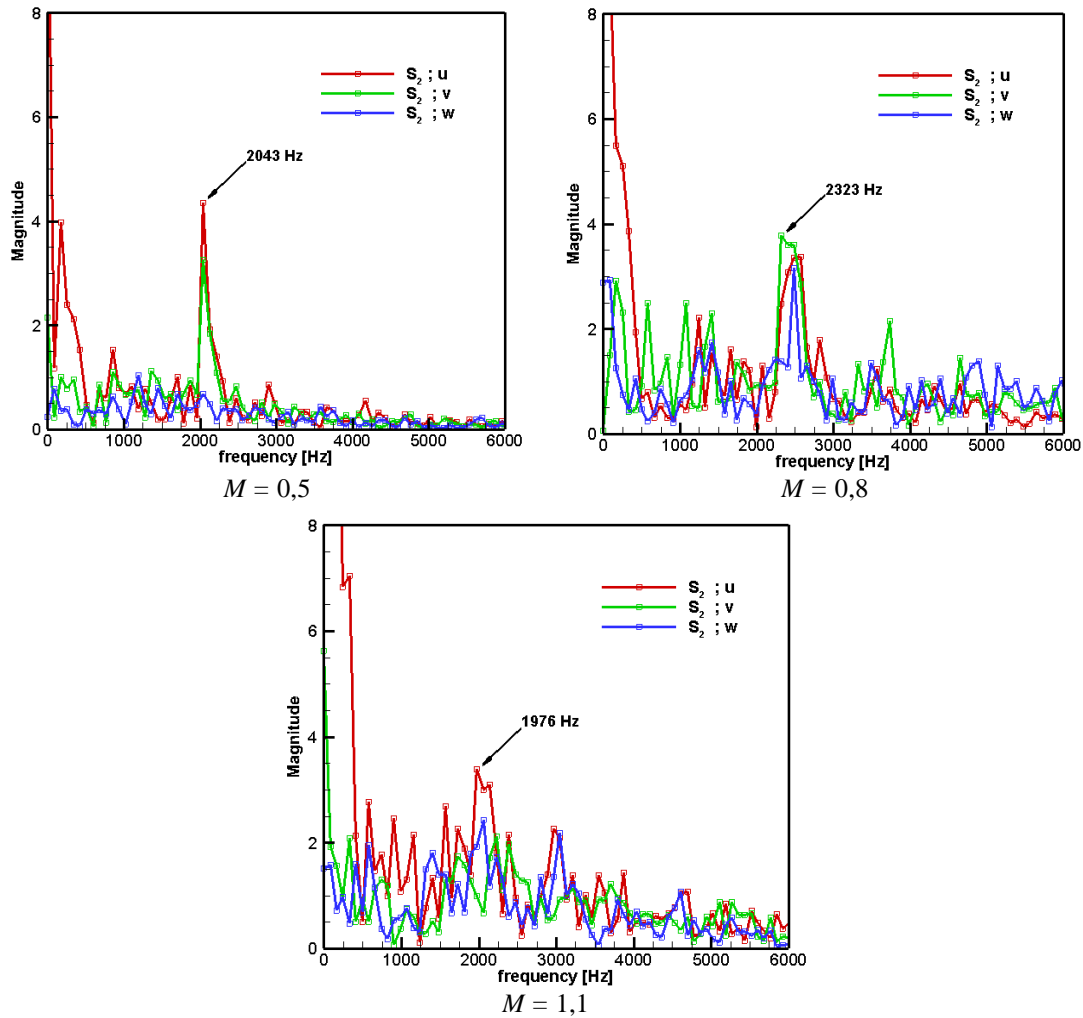
Gambar 4(c) menunjukkan hasil η_{aw} pada $M = 1,1$ terjadi “*over-prediction*” setelah mencapai $x/H > 4$. Fenomena ini berkebalikan dengan yang terjadi pada $M = 0,8$ yaitu pencampuran antara gas panas dengan gas dingin di belakang *slot exit* gas dingin lebih mendominasi pada saat proses pencampuran yang menyebabkan distribusi temperatur pada *adiabatic/protected wall* mendekati temperatur gas dingin, sehingga nilai η_{aw} yang didapat lebih tinggi dari $M = 0,5$ dan $0,8$.



Gambar 4. Film cooling effectiveness

3.3 Shedding frequency (f_s)

Gambar 5 menampilkan perbandingan *shedding frequency* (f_s) yang terjadi pada variasi *blowing ratios* $M = 0,5 - 1,1$. Untuk mendapatkan nilai f_s dipergunakan persamaan *fast Fourier transform* (FFT), yang mana secara berturut-turut untuk $M = 0,5$ didapat nilai f_s sebesar 2043 Hz, $M = 0,8$ sebesar 2323 Hz, dan $M = 1,1$ sebesar 1976 Hz. Selanjutnya dengan menggunakan persamaan *Strouhal number* (S_t) hasil prediksi untuk *dominant frequencies* tersebut dapat diekspresikan dengan nilai S_t seperti terlihat pada tabel 3. Hasil ini sesuai dengan penelitian lain yang serupa, diantaranya Sieverding, dkk. [19] yang mendapatkan nilai $S_t = 0,21$ pada penelitian dengan mempergunakan sebuah plat pada *square trailing-edge*. Hasil penelitian yang lain juga ditemukan nilai S_t sebesar 0,2 pada fenomena aliran turbulen di sekitar *blunt trailing edge* [20].



Gambar 5. Shedding frequency

Tabel 3. Strouhal number

Blowing ratio	Frekuensi (f_n)	Strouhal number (S_t)
0,5	2043 Hz	0,21
0,8	2323 Hz	0,24
1,1	1976 Hz	0,20

4. Kesimpulan

Penelitian secara numerik dengan mengaplikasikan model turbulensi *DES-SA* telah berhasil mengidentifikasi tiga parameter penting untuk menunjukkan karakteristik sistem *trailing edge cooling* pada sudu turbin gas yaitu *discharge coefficient* (C_D), *adiabatic film cooling effectiveness* (η_{aw}), dan *shedding frequency* (f_s). Nilai C_D meningkat seiring dengan peningkatan blowing ratio (M). Model turbulensi *DES-SA* mampu dipergunakan untuk memberikan prediksi data η_{aw} secara akurat pada $M = 0,5$, sedangkan kemampuan prediksi data pada $M = 0,8$ dan $1,1$ terjadi perbedaan yang lebih besar di daerah dekat *trailing edge*. Frekuensi aliran vorteks (f_s) berturut-turut 2043, 2323, dan 1976 Hz untuk masing-masing $M = 0,5; 0,8; \text{ dan } 1,1$.

Daftar Pustaka

- [1] J. Han, "Recent Studies in Turbine Blade Cooling," *Rotating Mach.*, vol. 10, no. 6, pp. 443–457, 2004.
- [2] P. Martini, A. Schulz, C. F. Whitney, and E. Lutum, "Experimental and Numerical Investigation of Trailing Edge Film Cooling Downstream of a slot with Internal Rib Arrays," *Proc. Instn Mech. Engrs., Part A*, vol. 217, pp. 393–401, 2003.
- [3] L. Tarchi, B. Facchini, S. Zecchi, and S. Stecco, "Experimental Investigation of Innovative Internal Trailing Edge Cooling Configurations with Pentagonal Arrangement and Elliptic Pin Fin," *Intentional J. Rotating Mach.*, vol. 2008, pp. 1–10, 2008.
- [4] A. L. Brundage and M. W. Plesniak, "Experimental Investigation of Airfoil Trailing Edge Heat Transfer and

- Aerodynamic Losses,” *J. Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 31, pp. 249–260, 2007.
- [5] B. Facchini, L. Innocenti, L. Tarchi, and E. Sergio, “Pedestal and Endwall Contribution In Heat Transfer In Thin Widge Shaped Trailing Edge,” *ASME Pap. No. GT2004-53152*, 2004.
- [6] J. Krueckels, M. Gritsch, and M. Schnieder, “Design Considerations and Validation of Trailing Edge Pressure Side Bleed Cooling,” *ASME Pap. No. GT2009-59161*, pp. 1–8, 2009.
- [7] C. Liess, “Experimental Investigation of Film Cooling With Ejection From a Row of Holes for the Application to Gas Turbine Blades,” *J. Eng. Power*, pp. 21–27, 1975.
- [8] T. Horbach, A. Schulz, and H. Bauer, “Trailing Edge Film Cooling of Gas Turbine Airfoils — External Cooling Performance of Various Internal Pin Fin Configurations,” *J. Turbomach.*, vol. 133, pp. 1–9, 2011.
- [9] Z. Yang and H. Hu, “An Experimental Investigation on the Trailing Edge Cooling of Turbine Blades,” *Propuls. Power Res.*, vol. 1, no. 1, pp. 36–47, 2012.
- [10] U. Bunge, C. Mockett, and F. Thiele, “Guidelines for Implementing Detached-Eddy Simulation using Different Models,” *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 11, pp. 376–385, 2007.
- [11] Y. Gao, X. Yan, J. Li, and K. He, “Investigations into Film Cooling and Unsteady Flow Characteristics in A Blade Trailing-Edge Cutback Region,” *J. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 10, pp. 5015–5029, 2018.
- [12] M. Effendy, Y. F. Yao, J. Yao, and D. R. Marchant, “DES Study of Blade Trailing Edge Cutback Cooling Performance with Various Lip-Thicknesses,” *Appl. Therm. Eng.*, pp. 1–29, 2015.
- [13] A. K. Viswanathan and D. K. Tafti, “Detached Eddy Simulation of Turbulent Flow and Heat Transfer in A Two-Pass Internal Cooling Duct,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 27, pp. 1–20, 2006.
- [14] J. Choi, S. Mhetras, J. Han, and S. C. Lau, “Film Cooling and Heat Transfer on Two Cutback Trailing Edge Models With Internal Perforated Blockages,” *J. Heat Transf.*, vol. 130, no. 1, pp. 1–13, 2008.
- [15] X. U. Chang-yue, C. Li-wei, and L. U. Xi-yun, “Large-Eddy and Detached-Eddy Simulations of the Separated Flow Around A Circular Cylinder*,” *J. Hydrodyn.*, vol. 19, no. 5, pp. 559–563, 2007.
- [16] M. Effendy, Y. Yao, and D. R. Marchant, “Detached-Eddy Simulation of Trailing-Edge (TE) Cutback Turbine Blade Cooling,” *MATEC Conf. No. 135*, vol. 8, pp. 1–13, 2017.
- [17] P. Martini, A. Schulz, and S. Wittig, “Experimental and Numerical Investigation of Trailing Edge Film Cooling by Circular Coolant Wall Jets Ejected from A Slot with Internal Rib Arrays,” *ASME Pap. No. GT-2003-38157*, pp. 1–9, 2003.
- [18] T. Horbach, A. Schulz, and H. Joerg Bauer, “Trailing Edge Film Cooling of Gas Turbine Airfoils-Effect of Ejection Lip Geometry on Film Cooling Effectiveness and Heat Transfer,” *Int. Symp. Heat Transf. Gas Turbine Syst. Antalya, Turkey*, no. August, 2009.
- [19] C. H. Sieverding and H. Heinemann, “The Influence of Boundary Layer State on Vortex Shedding From Flat Plates and Turbine Cascades,” *J. Turbomach.*, vol. 112, pp. 181–187, 1990.
- [20] D. R. Boldman, P. F. Brinich, and M. E. Goldstein, “Vortex Shedding from A Blunt Trailing Edge with Equal and Unequal External Mean Velocities,” *J. Flid Mech*, vol. 75, no. 4, pp. 721–735, 1976.