

SIMULASI NUMERIK KINERJA SISTEM PENDINGINAN TRAILING-EDGE PADA SUDU TURBIN GAS

NUMERICAL STUDY OF COOLING PERFORMANCE OF THE TRAILING-EDGE CUTBACK OF GAS TURBINE BLADE

¹⁾Agus Jamaldi, ²⁾Marwan Effendy dan ³⁾Muhammad Rahmadi

^{1,2,3)}Program Studi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik

Universitas Muhammadiyah Surakarta

Jl. A Yani Pabelan Kartasura Tromol Pos I Surakarta

*Email: agus.jamaldi@gmail.com, Marwan.Effendy@ums.ac.id, adhietjan@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kecocokan beberapa model turbulensi yang telah ditemukan para ilmuwan terdahulu seperti DES Spallart-Almaras (SA), DES realizable k- ϵ , dan scale adaptive simulation (SAS). Ketiga model turbulensi tersebut diujicobakan untuk mensimulasikan sistem pendinginan trailing edge pada sudu turbin. Riset simulasi dilakukan dengan memanfaatkan desain peneliti terdahulu, yaitu sistem pendingin “trailing cutback” yang memiliki integrasi dengan “pin-fin cooling”. Geometri spesimen uji, keadaan awal aliran fluida dan kondisi batasnya mengacu pada paper penelitian yang dipublikasikan Effendy dkk (2016). Investigasi berfokus pada dua parameter penting, yaitu adiabatic film cooling effectiveness (η_{aw}) dan discharge coefficient (C_D). Hasil simulasi menunjukkan bahwa model turbulensi DES-SA mampu memberikan hasil prediksi parameter η_{aw} yang konsisten terhadap data penelitian terdahulu dengan perbedaan hingga 4,25%. Sementara, nilai C_D tidak ada perbedaan yang bermakna dibanding data eksperimen maupun simulasi.

Kata Kunci :DES, film cooling effectiveness, discharge coefficient

ABSTRACT

This numerical study aims to evaluate the compatibility of turbulence models (i.e. DES SA, DES realisable k- ϵ , and SAS) found by several researchers. Three models were applied to simulate the cooling performance of trailing-edge cutback of gas turbine blade. The simulation was performed using an equilaterally staggered array of cylindrical pin-fins. The geometry of specimen, initial and boundary condition referred to Effendy paper (2016). The study focusses on two important parameters, i.e. the adiabatic film cooling effectiveness (η_{aw}) and the discharge coefficient (C_D). The results research showed that DES-SA would be consistent in the prediction of both parameters. The discrepancy of η_{aw} is about 4.25% compared to both experimental & numerical data. In terms of C_D , there is no significant deviation against the available data in the open literature.

Key Word :DES, film cooling effectiveness, discharge coefficient

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. Pada penggunaannya turbin gas ini berhubungan langsung dengan beberapa kondisi yang ekstrim pada saat beroperasi, seperti temperatur yang tinggi, gaya aerodinamis yang melewati sudu turbin, kekuatan material (*melting point*), dan tekanan yang tinggi akibat beroperasi pada temperatur dan kecepatan yang tinggi (Han, 2004) (Martini, Schulz, Whitney, & Lutum, 2003). Kondisi ini akan menyebabkan masalah yang serius pada komponen-komponen seperti “*line, vanes, dan blades*” akibat pengoperasian pada temperatur yang sangat tinggi (Lorenzo Tarchi, Facchini, Tarchi, Facchini, & Zecchi, 2008) (Yang & Hu, 2012) (Brundage & Plesniak, 2007). Untuk mengantisipasi dari kerusakan tersebut, diperlukan sistem pendinginan untuk menjaga temperatur material berada dibawah “*melting point*” sehingga aman dan menjaga ketahanan pada saat mesin beroperasi (Facchini, Innocenti, Tarchi,

& Sergio, 2017). Sistem pendinginan ini bertujuan untuk menghindari kerusakan yang terjadi pada komponen turbin gas. Di antara bagian sudu turbin gas, *trailing-edge* merupakan area yang perlu mendapat perhatian bagi para desainer dengan alasan adanya beban termal yang sangat tinggi saat pengoperasian turbin gas, namun konstruksinya sangat tipis berkaitan dengan kepentingan aerodinamika yang harus dicapainya.

Bagian *trailing-edge blades* menjadi topik yang menarik sejak adanya konflik kepentingan antara keperluan akan sistem pendinginan *trailing-edge* dan keharusan desain aerodinamika untuk sudu turbin (L Tarchi, Facchini, Zecchi, & Stecco, 2008) (Gritsch & Schnieder, 2009). Penelitian sudah dilakukan oleh Effendy, et al sejak tahun 2010 yaitu penelitian dengan pendekatan numerik menggunakan *steady* dan *unsteady* RANS (Effendy, Yao, & Marchant, 2017). Penelitian yang dilakukan membahas penggunaan metode turbulensi *Detached Eddy Simulation* (DES) pada prediksi kinerja pada bagian *trailing-edge cutback* pada sudu turbin gas. Pada penelitian ini akan diperdalam studi pendekatan secara numerik sistem pendinginan pada *trailing-edge* sudu turbin dengan metode *Detached Eddy Simulation* (DES) *Spalart-Allmaras* (SA), *DES realizable $k - \epsilon$* , dan dengan metode *Scale Adaptive Simulation* (SAS) menggunakan program Ansys R15.0.

METODE

Penelitian diawali dengan membuat desain 3-D untuk memodelkan model eksperimen yang dilakukan oleh Martini et.al. dengan kondisi eksperimen yang dapat dilihat pada tabel 1. Konstruksi *mesh* pada *preliminary research* telah dilakukan. Geometri dari benda yang akan dibuat sesuai dengan referensi yang dipakai sebagai part yang akan disimulasikan dengan cara mengadopsi dari penelitian yang dilakukan oleh Effendy, et al., (2016) yaitu meneliti tentang *Detached-Eddy Simulation of Trailing-Edge (TE) Cutback Turbine Blade Cooling*. Gambar 1 menampilkan domain komputasi disertai dengan kondisi batas aliran. Bagian *cooling slot* memiliki lebar 180 mm dengan jarak *pitch* (S) 12 mm. Pada lorong pendingin terdapat 5 baris susunan *pin-fins* di zona L_1 dengan sudut kemiringan (α) 10° . 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.

Proses simulasi dilakukan dengan menggunakan *ANSYS Fluent R.15*. Simulasi dilakukan dua tahap, pertama dilakukan simulasi dengan menggunakan variasi model turbulensi pada *blowing rasio* $M=0.5$. Setelah simulasi selesai kemudian dilakukan analisis terhadap model turbulensi yang mampu memberikan hasil *adiabatic film cooling effectiveness* (η_{aw}) sesuai dengan referensi penelitian-penelitian terdahulu. Tahap kedua setelah didapatkan model turbulensi yang mampu memberikan hasil prediksi yang baik dilanjutkan menganalisa nilai *discharge coefficient* (C_D) dengan variasi *blowing rasio* $M=0.5 - 1.1$. Hasil C_D yang didapat juga dibandingkan dengan data penelitian dari peneliti-peneliti yang lain, untuk mengetahui apakah nilai C_D konsisten dan sesuai dengan penelitian yang terdahulu.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi kinerja pendinginan pada sudu turbin gas dengan menggunakan variasi model turbulensi *DES* telah selesai dilakukan. Simulasi dilakukan dengan mengembangkan penelitian yang sudah dilakukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya, mengacu dari penelitian yang telah dilakukan Effendy, et al. Dalam penelitian ini dilakukan investigasi performa pendinginan pada *TE cutback* sudu turbin gas dengan beberapa model turbulensi sebagai pengembangan dari penelitian sebelumnya, tipe model turbulensi yang digunakan pada penelitian ini yaitu *Detached Eddy Simulation* (DES) *Spalart-Allmaras* (SA), *DES realizable $k - \epsilon$* , dan dengan metode *Scale Adaptive Simulation* (SAS). Beberapa parameter penting yang dianalisis pada penelitian ini yaitu *adiabatic film cooling effectiveness* (η_{aw}), dan *discharge coefficient* (C_D) yang terjadi pada dinding adiabatik dibagian belakang *slot exit*.

Film Cooling Effectiveness

Adiabatic film cooling effectiveness (η_{aw}) dapat diturunkan dari rasio perbedaan temperatur gas panas dan temperatur permukaan dinding terhadap perbedaan temperatur gas panas dan temperatur gas dingin. Untuk mengetahui *adiabatic film cooling effectiveness* (η_{aw}) dapat menggunakan persamaan (1).

$$\eta_{aw} = \frac{T_{hg} - T_{aw}}{T_{hg} - T_c} \quad (1)$$

Dimana T_{aw} adalah temperatur permukaan dinding adiabatik, T_{hg} adalah temperatur gas pada aliran utama (*mainstream flow*) pada *inflow region*, T_c adalah temperatur udara pendingin yang diukur pada bagian tengah dari *slot exit*.

Adiabatic film cooling effectiveness (η_{aw}) yang terjadi pada pada bagian permukaan *TE cutback* diinvestigasi pada blowing rasio $M=0.5$ dengan variasi model turbulensi yang berbeda dibandingkan dengan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh para peneliti sebelumnya. Hasil penelitian dapat dilihat pada gambar 2.

Dari gambar 2 dapat diketahui bahwa η_{aw} hasil penelitian dengan menggunakan beberapa model turbulensi memiliki hasil yang bervariasi. Dari perbandingan hasil penelitian terdahulu dengan penelitian yang dilakukan saat ini, model turbulensi *DES-SA* memberikan hasil yang identik dan mendekati hasil penelitian terdahulu dibandingkan dengan model turbulensi *DES realizable k-ε* maupun *SAS*. Model *DES-SA* memberikan hasil yang hampir sama dengan penelitian yang dilakukan Effendy, et.al dengan menggunakan *DES SST k-ω*. Tingkat perbedaan model turbulensi *DES-SA* dengan hasil eksperimen Martini, et.al., *DES Martini*, et.al., dan *DES SST k-ω* Effendy, et. al. masing-masing sebesar 8,21%; 6,09%; dan 1,5%. Perbedaan dari metode *DES realizable k-ε* dengan hasil eksperimen Martini, et.al., *DES Martini*, et.al., dan *DES SST k-ω* Effendy, et. al. masing-masing sebesar 16,27%; 13,84%; dan 5,68%. Perbedaan dari metode *SAS* dengan hasil eksperimen Martini, et.al., *DES Martini*, et.al., dan *DES SST k-ω* Effendy, et. al. masing-masing sebesar 23,9%; 20,99%; dan 12,55%. Berdasarkan hasil analisa, maka model turbulensi *DES-SA* mampu memberikan prediksi yang dapat diterima sebagai salah satu metode dalam menganalisa *adiabatic film cooling effectiveness* (η_{aw}) pada bagian *TE cutback*.

Sebagai indikasi hasil penelitian pada proses pencampuran antara gas panas dengan gas dingin terhadap hasil keefektifan pendinginan ditampilkan pada gambar 3. Dimana pada gambar tersebut merupakan distribusi temperatur dan η_{aw} non-dimensional yang terjadi pada hasil simulasi $M = 0.5$. Gambar 3 mengilustrasikan η_{aw} yang terjadi pada dinding adiabatik dibelakang *slot exit* (L_3). Nilai η_{aw} berada pada kisaran 0 - 1, jika nilai η_{aw} mendekati 0 maka mengindikasikan bahwa hasil pencampuran antara gas panas dan gas dingin temperatur campurannya mendekati temperatur gas panas, sedangkan jika nilai η_{aw} mendekati angka 1 maka temperatur campuran mendekati temperatur gas dingin. Dari hasil penelitian dapat diketahui bahwa nilai η_{aw} pada $x/H < 5$ berkisar antara 0.8 – 1 mengindikasikan bahwa terjadi pencampuran yang cukup baik antara gas panas dengan gas dingin sehingga mampu menghasilkan nilai η_{aw} yang mendekati temperatur gas pendingin, sedangkan pada $x/H > 5$ terjadi penurunan nilai η_{aw} . Hal ini terjadi karena pada bagian pangkal slot exit pada $x/H < 5$ terjadi pencampuran gas panas dan gas dingin yang baik, selanjutnya pada $x/H > 5$ pencampuran antara gas panas dan gas dingin cenderung masih banyak dipengaruhi oleh gas panas dengan kecepatan aliran yang tinggi. Ketidakteraturan distribusi η_{aw} yang terjadi pada bagian dinding adiabatik ini dikarenakan aliran turbulen yang diakibatkan oleh adanya susunan *pin-fin* pada bagian L_2 , hal ini juga sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Martini, et. al (Martini et al., 2003). Aliran turbulen menyebabkan terjadinya olakan aliran pencampuran antara gas panas dengan gas dingin, sehingga menyebabkan terjadi perbedaan nilai η_{aw} sepanjang dinding adiabatik (L_3).

Discharge Coefficient (C_D)

Discharge Coefficient (C_D) mempresentasikan kerugian *global pressure* dalam *cooling passage* yang merupakan perbandingan antara *measured coolant mass flow* terhadap *ideal mass flow*. Dengan kata lain merupakan rasio dari ekspansi isentropik total tekanan yang diukur dari aliran yang melawati saluran pendingin L_1 terhadap tekanan statik dari aliran utama, yang diformulasikan sebagai berikut.

$$C_D = \frac{m_{c,real}}{m_{c,ideal}}, \tag{2}$$

$$C_D = \frac{m_{c,real}}{p_{1,t} \left(\frac{p_2}{p_{1,t}}\right)^{\frac{k+1}{2k}} \cdot A_{slot} \cdot \sqrt{\frac{2k}{(k-1) \cdot R \cdot T_{1,t}} \left[\left(\frac{p_{1,t}}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}}, \tag{3}$$

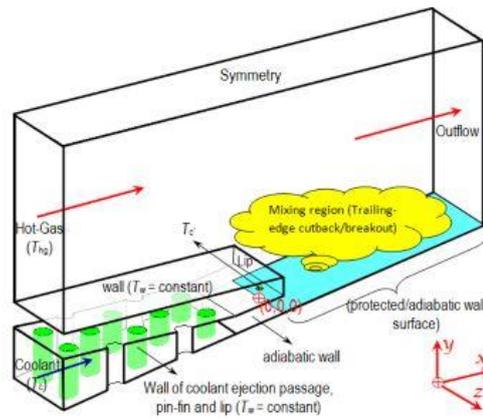
dimana $P_{1,t}$ dan $T_{1,t}$ adalah total tekanan dan temperatur pada *coolant inlet*, P_2 adalah tekanan statik di bagian *slot exit*, A_{slot} adalah luasan *slot exit*, K adalah kapasitas panas spesifik dan R adalah konstanta gas ideal.

Pada penelitian ini, *discharge coefficient (C_D)* dihitung dengan menggunakan blowing rasio antara $M = 0.5 - 1.1$. Kemudian dilakukan analisis dengan cara dibandingkan dengan penelitian-penelitian terdahulu. Analisis C_D dapat dilihat pada gambar 4.

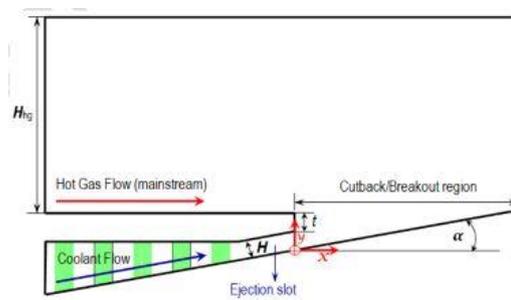
Dari gambar 4, dapat diketahui bahwa nilai C_D hasil penelitian dengan menggunakan model turbulensi *DES-SA* sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Nilai C_D meningkat seiring dengan bertambahnya *blowing ratio (M)*, hal ini konsisten dengan penelitian yang dilakukan Martini, *et. al* yang menyatakan bahwa *coefficient of discharge* meningkat dengan bertambahnya nilai angka Reynolds pada aliran gas pendingin (Martini et al., 2003) (Martini, Schulz, & Wittig, 2016). Hasil penelitian menunjukkan bahwa tidak terjadi perbedaan yang signifikan pada nilai C_D dari data eksperimen maupun simulasi yang sudah ada. Perbedaan nilai C_D pada variasi *blowing ratio* ini juga dipengaruhi oleh penggunaan *ribs* atau *pin-fin array* pada bagian L_2 . Dengan adanya *ribs* atau *pin-fin array* ini akan menyebabkan terjadinya perbedaan distribusi kecepatan aliran utama yang masuk ke bagian L_3 , sehingga berpengaruh terhadap nilai C_D yang dihasilkan. Hal ini juga konsisten dengan penelitian yang dilakukan Horbach, *et. al.* (Horbach, Schulz, & Bauer, 2016).

Tabel 1: Kondisi tes eksperimen (Martini, et al., 2006) (Martini, et al., 2003)

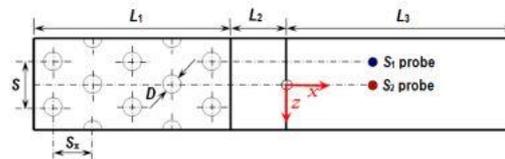
| Mainstream flow | Coolant flow |
|---------------------|---------------------------------|
| $Re_{hg} = 250,000$ | $T_c, L_2\ exit = 295 - 330\ K$ |
| $Ma_{hg} = 0.125$ | $T_c, L_1\ inlet = 293\ K$ |
| $u_{hg} = 56\ m/s$ | $Tu_c = 5\%$ |
| $Tu_{hg} = 7\%$ | $M = 0.2 - 1.25$ |
| $T_{hg} = 500\ K$ | |
| $P_{hg} = 105\ kPa$ | |



(a) Domain 3 dimensi



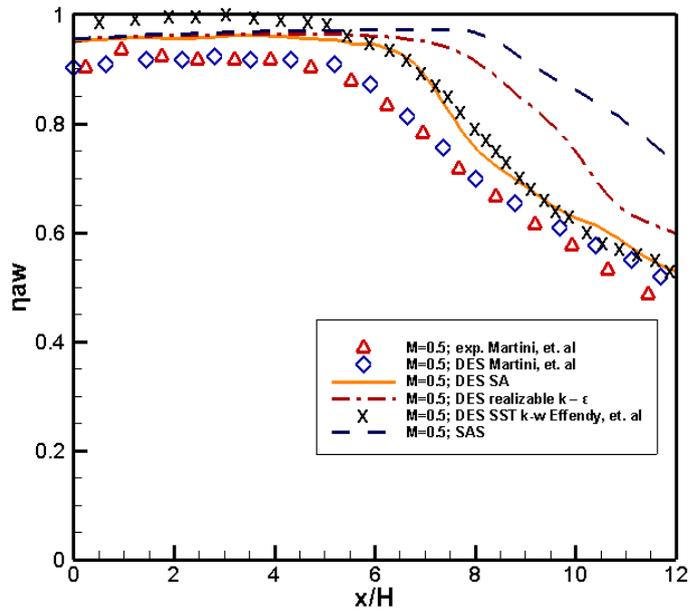
(b) Pandangan x-y



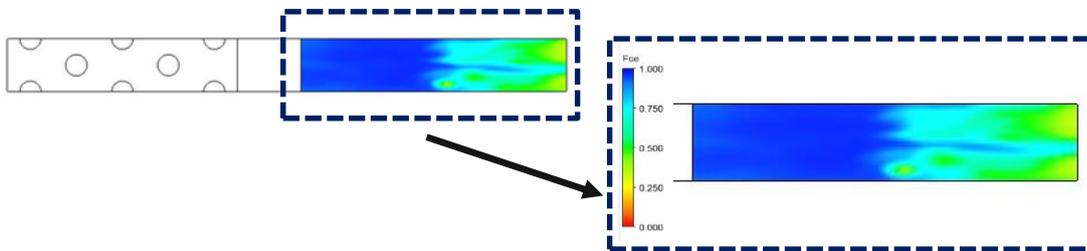
(c) Pandangan x-z

| Dimensi | L_1 | L_2 | L_3 | S | S_x | t | H | D | α |
|---------|-------|-------|-------|-----|-------|-----|-----|-----|----------|
| mm | 52 | 14.4 | 60 | 12 | 10.4 | 4.8 | 4.8 | 4.8 | 10° |

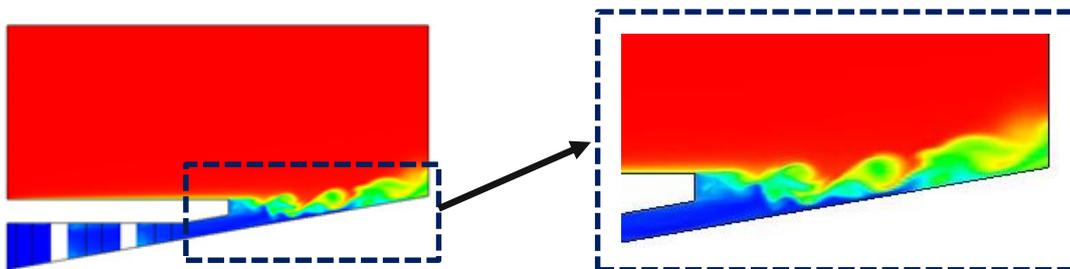
Gambar 1: Domain Komputasi (Effendy, et al., 2016)



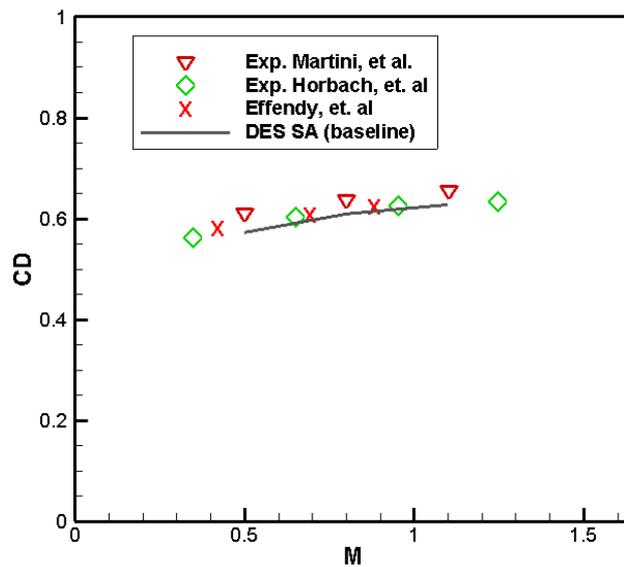
Gambar 2; *adiabatic film cooling effectiveness*



Gambar 3 (a); η_{aw} pada $M=0.5$



Gambar 3 (b); aliran turbulen percampuran gas panas dengan gas dingin



Gambar 4; Discharge Coefficient

KESIMPULAN

Simulasi kinerja pendinginan yang terjadi dibagian *trailing-edge (TE) cutback* sudu turbin gas telah dilakukan dengan menggunakan variasi model turbulensi seperti *DES-SA*, *DES realizable k-ε* dan *SAS*. Dari hasil analisis dapat diketahui bahwa model turbulensi *DES-SA* mampu memberikan hasil prediksi *adiabatic film cooling effectiveness* (η_{aw}) yang identik dengan hasil penelitian-penelitian terdahulu baik secara eksperimen maupun simulasi. Perbandingan hasil penelitian dalam tulisan ini dengan penelitian terdahulu menunjukkan perbedaan yang tidak terlalu besar, model turbulensi *DES-SA* memiliki perbedaan rata-rata dari penelitian terdahulu sebesar 4,25%, lebih kecil jika dibandingkan dengan menggunakan model turbulensi *DES realizable k-ε* sebesar 11,93% , dan model turbulensi *SAS* sebesar 19.15%.

Hasil penelitian dengan menggunakan *DES-SA* pada analisis *discharge coefficient* (C_D) juga memberikan hasil yang konsisten dengan data penelitian terdahulu. Nilai C_D bertambah seiring dengan bertambahnya *blowing ratio* (M). Peningkatan nilai M ini menyebabkan bertambahnya nilai angka *Reynolds* pada aliran gas pendingin sehingga berpengaruh terhadap nilai C_D . Berdasarkan hasil analisis maka model *DES-SA* mampu memberikan hasil prediksi yang baik pada simulasi kinerja sistem pendinginan pada sudu turbin gas dan dapat digunakan untuk penelitian yang akan datang.

DAFTAR PUSTAKA

- Brundage, A. L., & Plesniak, M. W. (2007). Experimental investigation of airfoil trailing edge heat transfer and aerodynamic losses, *31*, 249–260.
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2006.04.004>
- Effendy, M., Yao, Y., & Marchant, D. R. (2017). Detached-Eddy Simulation of Trailing-Edge (TE) Cutback Turbine Blade Cooling, *8*, 1–13. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713500008>
- Facchini, B., Innocenti, L., Tarchi, L., & Sergio, E. (2017). Pedestal And Endwall Contribution In Heat Transfer In Thin Wedge.
- Gritsch, M., & Schnieder, M. (2009). Design Considerations And Validation OF TRAILING EDGE PRESSURE Pressure side t d, 1–8.
- Han, J. (2004). Recent Studies in Turbine Blade Cooling *, *10(6)*, 443–457.
<https://doi.org/10.1080/10236210490503978>

- Horbach, T., Schulz, A., & Bauer, H. (2016). Trailing Edge Film Cooling of Gas Turbine Airfoils — External Cooling Performance of Various Internal Pin Fin Configurations, *133*(October 2011), 1–9. <https://doi.org/10.1115/1.4002964>
- Martini, P., Schulz, A., Whitney, C. F., & Lutum, E. (2003). Experimental and numerical investigation of trailing edge film cooling downstream of a slot with internal rib arrays, *217*, 393–401.
- Martini, P., Schulz, A., & Wittig, S. (2016). Experimental And Numerical Investigation Of Trailing Edge Film Cooling By Circular Coolant Wall Jets Ejected From A Slot With Internal Rib Arrays, 1–9.
- Tarchi, L., Facchini, B., Tarchi, L., Facchini, B., & Zecchi, S. (2008). Experimental Investigation of Innovative Internal Trailing Edge Cooling Configurations with Pentagonal Arrangement Experimental Investigation of Innovative Internal Trailing Edge Cooling Configurations with Pentagonal Arrangement and Elliptic Pin Fin, (May 2014). <https://doi.org/10.1155/2008/109120>
- Tarchi, L., Facchini, B., Zecchi, S., & Stecco, S. (2008). Experimental Investigation of Innovative Internal Trailing Edge Cooling Configurations with Pentagonal Arrangement and Elliptic Pin Fin, *2008*. <https://doi.org/10.1155/2008/109120>
- Yang, Z., & Hu, H. (2012). An experimental investigation on the trailing edge cooling of turbine blades. *Propulsion and Power Research*, *1*(1), 36–47. <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2012.10.007>