

ANALISIS KETIDAKPASTIAN DATA PERHITUNGAN PERPINDAHAN PANAS DAN PRESSURE DROP ALIRAN UDARA MELEWATI TUBE PANAS DI DALAM SALURAN

Yosef Gokiasi Patar Napitu¹, Syaiful², Bambang Yunianto²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

*E-mail: ygpna7@gmail.com

Abstrak

CDW (*Concave Delta Winglet*) adalah jenis *vortex generator* (VG) yang efektif untuk meningkatkan perpindahan panas. *Perforated Concave Delta Winglet Vortex Generators* (PCDW VGs) memiliki kemampuan mengurangi *pressure drop* dibandingkan dengan CDW VGs konvensional. Oleh karena itu, penelitian eksperimental ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak PCDW VGs terhadap kinerja termal-hidrolik dengan memvariasikan sudut serang, aspek rasio, dan susunan VGs. PCDW VGs disusun dalam konfigurasi *common-flow-down* dengan variasi sudut serang 10° dan 20°, serta konfigurasi *inline* dan *staggered* pada aspek rasio 1 hingga 3 dengan interval 0,5. Didapati bahwa, Overall Error Nu untuk seluruh variasi PCDW berada dibawah 1%. Begitu juga nilai overall error *pressure drop* berada di bawah 4% untuk seluruh variasi VGs

Kata kunci: laju perpindahan panas; *perforated concave delta winglet*; *pressure drop*; *vortex generator*

Abstract

The *Concave Delta Winglet* (CDW) is one of the effective *vortex generators* (VG) for enhancing heat transfer. *Perforated Concave Delta Winglet Vortex Generators* (PCDW VGs) have the ability to reduce *pressure drop* compared to conventional CDW VGs. Therefore, this experimental study aims to evaluate the impact of PCDW VGs on thermal-hydraulic performance by varying the angle of attack, aspect ratio, and arrangement of VGs. PCDW VGs are arranged in a *common-flow-down* configuration with variations in angle of attack of 10° and 20°, and *inline* and *staggered* configurations with aspect ratios from 1 to 3 at intervals of 0.5. It is found that the Overall Error in Nu for all PCDW variations is below 1%. Similarly, the overall error values for *pressure drop* are below 4% for all VGs variations.

Keywords: heat transfer rate; *perforated concave delta winglet*; *pressure drop*; *vortex generator*

1. Pendahuluan

Salah satu metode untuk meningkatkan perpindahan panas dalam aliran adalah dengan menempatkan VGs di dalam saluran yang dapat menghasilkan vortex transversal atau longitudinal [1]. Performa termal longitudinal vortex lebih unggul dibandingkan dengan vortex transversal untuk nilai *pressure drop* yang setara [2]. Oleh karena itu, banyak penelitian difokuskan pada pengembangan VGs yang mampu menghasilkan longitudinal vortex [3] [4]. Salah satu VGs yang mampu menghasilkan longitudinal vortex adalah tipe delta winglet, dan memiliki performa termal yang lebih baik daripada vortex generator (VG) tipe wing [5].

Dalam penelitian sebelumnya, telah dilakukan modifikasi geometri dan konfigurasi pada VGs tipe wing dan winglet untuk meningkatkan perpindahan panas. Dogan dan rekan [6] melakukan studi mengenai pengaruh konfigurasi VGs tipe winglet terhadap peningkatan perpindahan panas dalam saluran rectangular. Hasil studi mereka menyatakan bahwa pembentukan longitudinal vortex dapat meningkatkan pencampuran fluida dan performa termal hidrolik (TEF = 1,15 pada Re = 5000). Wang dan tim [7] menemukan bahwa penggunaan novel combined winglet pairs (NCWPs) pada finned-tube heat exchanger (FTHE) dapat meningkatkan perpindahan panas dan *pressure drop* masing-masing sebesar 1,8-24,2% dan 1,3-29,1% dibandingkan dengan baseline. Beberapa parameter memengaruhi performa termal-hidrolik untuk menentukan geometri VGs terbaik. Wu dan kolega [8] melakukan studi eksperimental dan simulasi numerik terkait penggunaan delta winglet VGs (DW VGs) dengan variasi sudut serang 15°, 30°, 45°, dan 60°. Hasil penelitian mereka menyimpulkan bahwa nilai Nu meningkat seiring dengan peningkatan sudut serang.

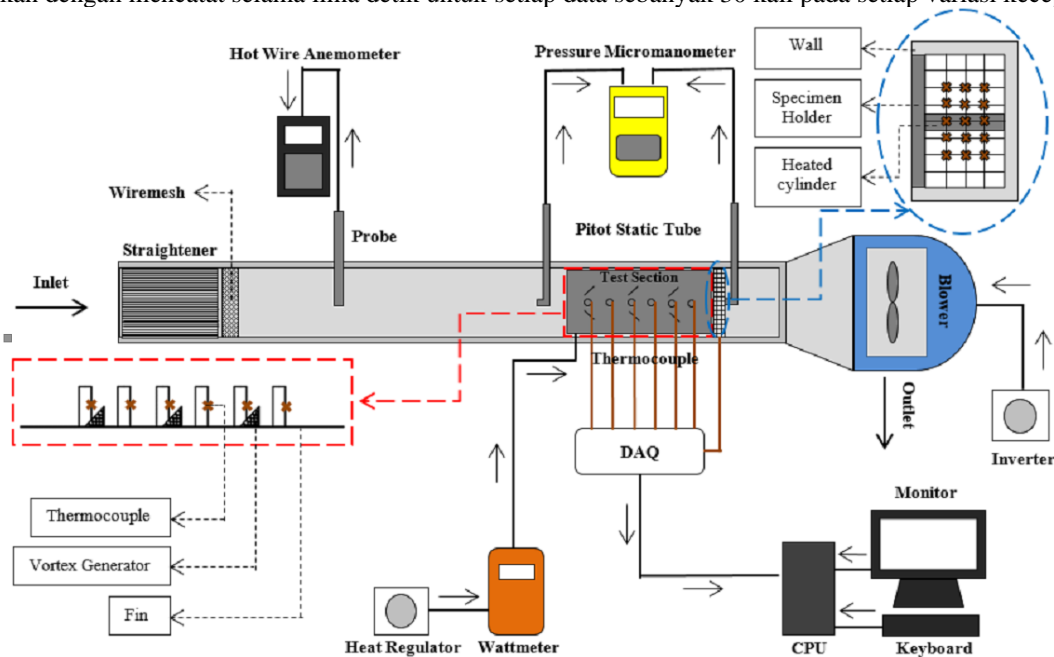
Ketidakpastian, dalam konteks studi eksperimental, mencakup rentang keraguan atau kurangnya ketepatan dalam kuantitas yang diukur [9]. Ini adalah karakteristik yang melekat dalam setiap proses pengukuran, muncul dari berbagai sumber seperti batasan instrumental, fluktuasi lingkungan, dan variabilitas inheren dalam sistem fisik. Memahami dan mengukur ketidakpastian adalah langkah esensial menuju kepercayaan temuan eksperimental [10]. Analisis

ketidakpastian yang komprehensif melibatkan identifikasi dan karakterisasi berbagai sumber yang berkontribusi pada ketidakpastian keseluruhan dalam pengukuran eksperimental. Sumber-sumber ini mungkin melibatkan kesalahan instrumental, fluktuasi lingkungan, bias sistematis, dan variabilitas yang diperkenalkan oleh pengaturan eksperimental. Dengan memahami sumber-sumber ini, peneliti dapat lebih memahami faktor-faktor yang memengaruhi ketelitian dan keandalan data mereka [11]. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan perhitungan ketidakpastian data pada eksperimen perpindahan panas dan pressure drop dalam aliran. Pengukuran suhu inlet, outlet, dinding tubes, dan pressure drop dilakukan untuk mendapatkan perhitungan ketidakpastian data.

2. Metode Penelitian

2.1 Perlengkapan dan prosedur pengujian

Eksperimen dilakukan di Laboratorium Termofluida Universitas Diponegoro, Indonesia, dengan skema alat pengujian seperti yang terlihat pada Gambar 2.1. Pada eksperimen ini, laju perpindahan panas dari tabung panas ke fluida dan tekanan fluida diukur dengan memasang PCDW VGs di dalam saluran rectangular yang terbuat dari kaca dengan ukuran 16,5 cm x 6,4 cm x 1 cm. Udara dihisap melalui tubes panas dengan/tanpa VGs oleh blower yang ditempatkan di ujung saluran. Kecepatan aliran udara diatur oleh inverter (Mitsubishi Electric tipe FR-D700 dengan ketelitian $\pm 0,01$) yang terhubung dengan blower. Udara masuk melalui straightener yang terdiri dari pipa aluminium dengan diameter 5 mm dan panjang 290 mm, melewati wiremesh untuk mencapai keseragaman aliran. Kecepatan udara diukur dengan hot wire anemometer (Lutron AM-4204, akurasi $\pm 0,1$). Kecepatan udara divariasikan dari 0,4 m/det hingga 2 m/det dengan interval 0,2 m/det. Fluks panas konstan sebesar 40 W diberikan ke enam tubes dengan panjang, lebar, dan tebal berturut-turut 500 mm, 165 mm, dan 1 mm. Pada pengujian performa termal, laju panas diatur dengan regulator heater (OKI TDGC2- 1kVA) yang terhubung dengan wattmeter (Lutron DW-6060 dengan ketelitian $\pm 1,0$). Termokopel tipe K digunakan untuk mengukur suhu udara masuk, permukaan tube panas, dan udara keluar. Termokopel terhubung dengan akuisisi data (Advantech tipe USB-4718) yang dihubungkan dengan CPU. Pengujian pressure drop dilakukan dengan dua tabung pitot di depan dan di belakang spesimen uji, yang terhubung dengan micromanometer untuk mengukur tekanan. Pengukuran dilakukan dengan mencatat selama lima detik untuk setiap data sebanyak 30 kali pada setiap variasi kecepatan.



Gambar 2.1 Skema alat pengujian laju perpindahan panas dan pressure drop

2.2 Metode Perhitungan

2.2.1 Nilai Rata-Rata (mean)

Perhitungan ini digunakan untuk mengetahui rata-rata jika kita mengambil data sejumlah N sehingga data yang akan kita ambil berupa X_1 hingga X_N .

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad (1)$$

2.2.2 Standar Uncertainty

Standar ketidakpastian digunakan untuk mengetahui ketidakpastian hasil dari yang diperoleh atau dengan kata lain standar ketidakpastian menunjukkan seberapa dekat hasil nilai rata-rata terhadap nilai data. Standar ketidakpastian dapat diketahui dengan Persamaan 2

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - X)^2}{(N - 1)}} \quad (2)$$

2.2.3 Standard Uncertainty of The Mean

Pada dasarnya, standar ketidakpastian sebenarnya tidak memberikan nilai ketidakpastian dalam perhitungan sehingga diperlukan rata-rata standar ketidakpastian, dimana nilai rata-rata standar ketidakpastian ini merupakan uncertainty dalam perhitungan. Adapun rumus yang dapat digunakan untuk menghitung rata-rata standar ketidakpastian ini adalah sebagai Persamaan 3 berikut

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - X)^2}{N(N - 1)}} \quad (3)$$

2.2.4 Overall Uncertainty

Dalam setiap perhitungan yang melibatkan persamaan tertentu akan melibatkan beberapa komponen yang masing-masing mempunyai ketidakpastian atau uncertainty. Dengan kata lain jika suatu fungsi f mempunyai komponen variabel independen u_1, u_2, u_3 , hingga u_n maka uncertainty keseluruhannya dapat dihitung dengan Persamaan 4.

$$E_{a_{rss}} = \sqrt{(\Delta u_1 \frac{\partial f}{\partial u_1})^2 + (\Delta u_2 \frac{\partial f}{\partial u_2})^2 + (\Delta u_3 \frac{\partial f}{\partial u_3})^2 + \dots + (\Delta u_n \frac{\partial f}{\partial u_n})^2} \quad (4)$$

2.3 Validasi

Eksperimen pada studi sekarang ini divalidasi dengan menggunakan hasil eksperimen dari Whitaker. Data pada studi sekarang ini menggunakan data baseline yang dihasilkan oleh eksperimen yang telah dilakukan oleh Yafid dkk[14]. Pada eksperimen studi tersebut, aliran udara mengenai tabung didalam saluran persegi.

3. Ketidakpastian Data (uncertainty)

3.1 Ketidakpastian Data Perpindahan Panas

Pada studi ini, untuk mengetahui penyimpangan yang terjadi maka digunakan perhitungan *mean, standar deviation of the mean*, dan *overall uncertainty*.

Tabel 4. 1 Data temperatur permukaan *tube* dari pengujian *baseline* pada kecepatan aliran 0,4 m/det

Data ke	T_{w1} (°C)	T_{w2} (°C)	T_{w3} (°C)	T_{w4} (°C)	T_{w5} (°C)	T_{w6} (°C)
1	49,189	51,212	48,321	49,767	47,800	51,269
2	49,181	51,175	48,314	49,789	47,764	51,262
3	49,143	51,166	48,305	49,751	47,784	51,253
4	49,119	51,171	48,280	49,726	47,759	51,257
5	49,151	51,203	48,283	49,729	47,733	51,260
6	49,098	51,149	48,288	49,734	47,767	51,265
7	49,096	51,148	48,228	49,732	47,736	51,292
8	49,087	51,139	48,248	49,665	47,727	51,226

Data yang didapat pada Tabel 4.1 dapat diolah untuk mendapatkan temperatur rata-rata permukaan *tube* (\bar{T}_w) dengan menggunakan persamaan 5

$$\bar{T}_w = \frac{\bar{T}_{w1} + \bar{T}_{w2} + \bar{T}_{w3} + \bar{T}_{w4} + \bar{T}_{w5} + \bar{T}_{w6}}{6} \quad (5)$$

Dari Persamaan 10 diperoleh nilai \bar{T}_w sebesar 49,557 °C. Kemudian, dapat dihitung \bar{T}_w rata-rata standar dengan menggunakan Persamaan 6.

$$s_{T_w} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_{wi} - \bar{T}_w)^2}{N(N-1)}} \quad (6)$$

Nilai s_{T_w} yang didapat ialah 0,194 °C sehingga untuk nilai \bar{T}_w dapat ditulis $49,557 \pm 0,194$ °C. Sedangkan untuk nilai \bar{T}_{in} dan \bar{T}_{out} didapati berturut-turut sebesar 28,885 °C dan 32, 995 °C. Lalu, rata-rata standar kepastiannya dapat dihitung dengan persamaan 7 dan 8.

$$s_{T_{in}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_{in_i} - \bar{T}_{in})^2}{N(N-1)}} \quad (7)$$

$$s_{T_{out}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_{out_i} - \bar{T}_{out})^2}{N(N-1)}} \quad (8)$$

Sehingga didapatkan nilai $s_{T_{in}}$ dan $s_{T_{out}}$ berturut-turut sebesar 0,012 °C dan 0,045 °C. Kemudian nilai \bar{T}_{in} dan \bar{T}_{out} dapat ditulis menjadi $28,885 \pm 0,012$ °C dan $32, 995 \pm 0,045$ °C. Lalu juga didapat nilai Q pada kecepatan 0,4 m/s sebesar 19,474 W. Untuk mencari nilai galat pada Q digunakan persamaan 9.

$$E_{ars_{sQ}} = \sqrt{(\Delta T_{in} \frac{\partial Q}{\partial T_{in}})^2 + (\Delta T_{out} \frac{\partial Q}{\partial T_{out}})^2} \quad (9)$$

Dimana $\frac{\partial Q}{\partial T_{in}} = \frac{\dot{m} c_p (\bar{T}_{out} - \bar{T}_{in})}{\bar{T}_{in}}$ sedangkan $\frac{\partial Q}{\partial T_{out}} = \frac{\dot{m} c_p (\bar{T}_{out} - \bar{T}_{in})}{\bar{T}_{out}}$. Dengan data yang diperoleh sebelumnya maka dapat dihitung bahwa $E_{ars_{sQ}}$ sebesar 0,028 W. Jadi, laju perpindahan panas dapat ditulis menjadi $Q = 19,474 \pm 0,028$.

Selanjutnya, LMTD dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.11 dan nilainya sebesar 18,565 °C. Nilai galat LMTD dapat dihitung dengan Persamaan 10.

$$E_{ars_{sLMTD}} = \sqrt{(\Delta T_{in} \frac{\partial LMTD}{\partial T_{in}})^2 + (\Delta T_w \frac{\partial LMTD}{\partial T_w})^2 + (\Delta T_{out} \frac{\partial LMTD}{\partial T_{out}})^2} \quad (10)$$

Nilai galat LMTD yang didapat dari Persamaan 15 ialah 0,077 °C. Maka nilai LMTD dapat ditulis menjadi $18,565 \pm 0,077$ °C. Setelah itu, Nu pada kecepatan 0,4 m/s dapat diperoleh dengan Persamaan 2.9 yaitu sebesar 164,799. Untuk perhitungan galat Nu dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 11.

$$E_{ars_{sNu}} = \sqrt{(\Delta LMTD \frac{\partial Nu}{\partial LMTD})^2 + (\Delta Q \frac{\partial Nu}{\partial Q})^2} \quad (11)$$

Sehingga nilai galat Nu didapati sebesar 0,725. Jadi, Nu untuk *baseline* dengan kecepatan udara masuk 0,4 m/s ialah sebesar $164,799 \pm 0,725$. Cara yang sama dapat digunakan juga untuk menghitung galat h yaitu dengan menggunakan Persamaan 12.

$$E_{ars_{sh}} = \sqrt{(\Delta Nu \frac{\partial h}{\partial Nu})^2} \quad (12)$$

Sehingga nilai galat h didapati sebesar 0,210. Jadi nilai h dapat ditulis sebesar $47,598 \pm 0,210$ W/(m².K). Untuk mencari *overall uncertainty* pada bilangan Nu pada penggunaan PCDW VG baik susunan *inline* dan *staggered* maupun dengan sudut serang 10° dan 20° dapat digunakan metode perhitungan yang sama. Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.2 sebagai berikut.

Tabel 4. 2 Data Rata-Rata Error Nu

Aspek Rasio	Overall Error Nu			
	10° <i>Inline</i>	10° <i>Staggered</i>	20° <i>Inline</i>	20° <i>Staggered</i>
1	0,59%	0,57%	0,38%	0,39%
1,5	0,44%	0,27%	0,41%	0,41%
2	0,67%	0,59%	0,40%	0,40%
2,5	0,67%	0,41%	0,42%	0,42%
3	0,82%	0,82%	0,29%	0,29%

3.2 Ketidakpastian Data Pressure Drop

Pengujian *pressure drop* untuk kasus *baseline* dengan kecepatan 2 m/s ditunjukkan pada Tabel 4.3 dibawah. Dari data tersebut dapat diperoleh rata-rata *pressure drop* dengan nilai 0,0013 dalam H₂O yang dihitung dengan persamaan 13.

$$\bar{\Delta P} = \frac{\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \dots + \Delta P_{30}}{30} \quad (13)$$

Tabel 4. 3 Data *Pressure drop* dari pengujian *baseline* dengan kecepatan aliran 2 m/s

Pressure drop (in H ₂ O)					
Data ke	ΔP	Data ke	ΔP	Data ke	ΔP
1	0,013	11	0,013	21	0,013
2	0,013	12	0,013	22	0,012
3	0,013	13	0,012	23	0,013
4	0,013	14	0,012	24	0,012
5	0,012	15	0,013	25	0,013
6	0,013	16	0,012	26	0,013
7	0,013	17	0,013	27	0,013
8	0,012	18	0,012	28	0,013
9	0,013	19	0,012	29	0,012
10	0,013	20	0,013	30	0,012

Selanjutnya, rata-rata standar ketidakpastian dapat dihitung menggunakan persamaan 14 sehingga diperoleh $8,9 \times 10^{-5}$ in H₂O.

$$s_{\Delta P} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta P_i - \bar{\Delta P})^2}{N(N-1)}} \quad (14)$$

Jadi, nilai *pressure drop* untuk *baseline* pada kecepatan aliran 2 m/s adalah sebesar $0,013 \pm 8,9 \times 10^{-5}$ H₂O. Persamaan 15 digunakan untuk menghitung error *pressure drop* dan nilainya didapat sebesar 0,71%.

$$\% \text{ Error}_{\Delta P} = \left(\frac{s_{\Delta P}}{\bar{\Delta P}} \right) 100\% \quad (15)$$

Metode perhitungan yang sama digunakan untuk keseluruhan data. Tabel 4.4 menunjukkan hasil perhitungan *overall error* untuk *pressure drop* setiap jenis variasi PCDW VG yang digunakan pada eksperimen kali ini.

Tabel 4. 4 *Overall uncertainty pressure drop* pada setiap variasi PCDW VG

Aspek Rasio	Overall Error Pressure Drop			
	10° <i>Inline</i>	10° <i>Staggered</i>	20° <i>Inline</i>	20° <i>Staggered</i>
1	3,41%	3,10%	2,39%	1,54%
1,5	3,23%	2,87%	1,55%	1,83%
2	2,98%	2,54%	1,51%	1,53%
2,5	2,51%	2,05%	1,49%	1,60%
3	1,80%	1,12%	1,60%	1,79%

5. Kesimpulan

Pada penelitian ini, telah dilakukan analisis ketidakpastian data evaluasi performa termo-hidrolik untuk mendapatkan performa yang maksimal dari penggunaan VG dengan variasi aspek rasio. Berdasarkan hasil data eksperimen ini dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Nilai Overall Error Nu pada pemasangan PCDW VGs untuk semua variasi memiliki nilai dibawah 1%
2. Nilai Overall Error *pressure drop* pada pemasangan PCDW VGs untuk semua variasi memiliki nilai dibawah 4%

4. Daftar Pustaka

- [1] A. Datta, D. Sanyal, and A. K. Das, "Numerical investigation of heat transfer in microchannel using inclined longitudinal vortex generator," *Appl Therm Eng*, vol. 108, pp. 1008–1019, 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.07.165.
- [2] M. Fiebig, P. Kallweit, N.K. Mitra, S. Tiggelbeck, Heat transfer enhancement and drag by longitudinal vortex generators in channel flow, *Experimental Thermal and Fluid Science* 4 (1991) 103–114.
- [3] Z. Zhao, L. Luo, D. Qiu, X. Zhou, Z. Wang, and B. Sundén, "Experimental evaluation of longitudinal and transverse vortex generators on the endwall of a serpentine passage," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 176, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.107521.
- [4] H. Z. Demirağ, M. Doğan, and A. A. İğci, "The experimental and numerical investigation of novel type conic vortex generator on heat transfer enhancement," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 191, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2023.108383.

- [5] C. B. Allison and B. B. Dally, "Effect of a delta-winglet vortex pair on the performance of a tube-fin heat exchanger," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 50, no. 25–26, pp. 5065–5072, Dec. 2007, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.08.003.
- [6] M. Dogan and S. Erzincan, "Experimental investigation of thermal performance of novel type vortex generator in rectangular channel," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 144, May 2023, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106785.
- [7] W. Wang, Y. Bao, and Y. Wang, "Numerical investigation of a finned-tube heat exchanger with novel longitudinal vortex generators," *Appl Therm Eng*, vol. 86, pp. 27–34, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.04.041. [8] Song, K., Tagawa, T., Chen, Z. and Zhang, Q., 2019. Heat transfer characteristics of *concave* and convex curved vortex generators in the channel of plate heat exchanger under laminar flow. *International Journal of Thermal Sciences*, 137, pp.215-228.
- [8] J. M. Wu and W. Q. Tao, "Effect of longitudinal vortex generator on heat transfer in rectangular channels," *Appl Therm Eng*, vol. 37, pp. 67–72, 2012, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.01.002. [10] Bagheri, H., Mirjalily, S.A.A., Oloomi, S.A.A. and Salimpour, M.R., 2021. Effects of micro-vortex generators on shock wave structure in a low aspect ratio duct, numerical investigation. *Acta Astronautica*, 178, pp.616-624.
- [9] Wate, Parag, Volker Coors, Marco Iglesias, and Darren Robinson. 2019. "Uncertainty Assessment of Building Performance Simulation." Pp. 257–87 in Elsevier eBooks.
- [10] Moffat, R. J. 1985. "Using Uncertainty Analysis in the Planning of an Experiment." *Journal of Fluids Engineering-Transactions of the Asme* 107(2):173–78. doi: 10.1115/1.3242452.
- [11] Coleman, Hugh W., and W. Glenn Steele. 1995. "Engineering Application of Experimental Uncertainty Analysis." *AIAA Journal* 33(10):1888–96. doi: 10.2514/3.12742.