

## ANALISA KETIDAKPASTIAN PADA ALIRAN UDARA MENGENAI TABUNG DIDALAM SALURAN PERSEGI

\*Naufal Ahmad Faiq<sup>1</sup>, Syaiful<sup>2</sup>, Muchammad<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: [naufalfaiq27@gmail.com](mailto:naufalfaiq27@gmail.com)

### Abstrak

Dalam domain yang dinamis dari studi eksperimental, makalah ini menyelidiki pentingnya analisis ketidakpastian dan menjelaskan beragam dampaknya pada proses ilmiah. Ketidakpastian merupakan aspek yang selalu mengiringi dalam penelitian eksperimental, melibatkan berbagai faktor yang berkontribusi pada ketidaktepatan dan variasi dalam pengukuran. Pentingnya memahami dan mengukur ketidakpastian diselidiki secara mendalam, dengan penekanan yang diberikan pada peran fundamentalnya dalam meningkatkan kredibilitas dan ketangguhan temuan eksperimental. Analisis ketidakpastian yang solid memiliki dampak yang signifikan terhadap interpretasi dan aplikabilitas hasil eksperimental, mendorong terciptanya transparansi dan memfasilitasi pengambilan keputusan yang lebih terinformasi. Oleh karena itu, makalah ini melakukan eksplorasi terhadap hasil dari eksperimen perpindahan panas dan penurunan tekanan pada aliran udara melalui tabung dalam saluran persegi.

**Kata kunci:** analisis ketidakpastian; eksperimental

### Abstract

*Within the dynamic landscape of experimental research, this paper delves into the profound significance of uncertainty analysis, shedding light on its multifaceted impact on the scientific endeavor. Uncertainty, a ubiquitous presence in experimental investigations, encompasses a myriad of factors that contribute to discrepancies and fluctuations in measurements. The paper scrutinizes the importance of comprehending and quantifying uncertainty, underscoring its foundational role in fortifying the credibility and resilience of experimental conclusions. A comprehensive uncertainty analysis exerts a profound influence on the interpretation and applicability of experimental outcomes, fostering transparency and facilitating more informed decision-making processes. Thus, the paper embarks on an exploration of the experimental outcomes pertaining to heat transfer and pressure drop in the airflow surrounding tubes within a square channel, delving into the intricate interplay of uncertainty within the experimental framework.*

**Keywords:** experimental; uncertainty analysis

### 1. Pendahuluan

Dalam ranah penelitian eksperimental, analisis ketidakpastian memainkan peran sentral dalam meningkatkan keandalan dan keakuratan temuan ilmiah [1]. Ketidakpastian, sebagai pendamping konstan dalam penelitian eksperimental, melibatkan berbagai faktor yang berkontribusi pada ketidaktepatan dan variasi dalam pengukuran [2]. Pemahaman mendalam serta pengukuran ketidakpastian menjadi landasan penting untuk memperkuat kredibilitas hasil eksperimental. Analisis ketidakpastian yang cermat tidak hanya memengaruhi interpretasi hasil eksperimental, tetapi juga memberikan dasar transparansi yang penting, memfasilitasi pengambilan keputusan yang lebih terinformasi [3]. Pentingnya memahami ketidakpastian dalam konteks eksperimen tidak hanya terletak pada ketelitian dan akurasi data, tetapi juga mempengaruhi desain eksperimental dan interpretasi temuan [4]. Ketidakpastian muncul dari berbagai sumber, termasuk batasan peralatan, fluktuasi lingkungan, dan variasi alami dalam sistem yang diteliti. Dalam menghadapi ketidakpastian ini, peneliti dapat mengoptimalkan metode eksperimental mereka dan meningkatkan validitas temuan yang dihasilkan [5].

Ketidakpastian, dalam konteks studi eksperimental, mencakup rentang keraguan atau kurangnya ketepatan dalam kuantitas yang diukur [6]. 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 [7]. 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 [8].

Analisis ketidakpastian bukan hanya sekadar langkah teknis, melainkan suatu strategi integral untuk meningkatkan kualitas penelitian. Dengan mengidentifikasi dan mengukur ketidakpastian dengan cermat, peneliti dapat mengonsep strategi mitigasi yang dapat meningkatkan keandalan dan reproduktibilitas hasil eksperimental [9]. Pemahaman mendalam terhadap sumber-sumber ketidakpastian memberikan dasar yang kuat untuk mengatasi tantangan dan memaksimalkan potensi kontribusi penelitian eksperimental. Analisis ketidakpastian yang matang memengaruhi interpretasi hasil eksperimental dan dapat mengarah pada penemuan yang lebih dapat diandalkan [10]. Kemampuan untuk mengidentifikasi, mengukur, dan mengelola ketidakpastian memberikan ketelitian tambahan terhadap temuan penelitian, memungkinkan interpretasi yang lebih akurat dan bermakna. Keterbukaan terhadap ketidakpastian juga membuka jalan bagi perbandingan yang lebih adil antarpelitian, meningkatkan kualitas dan daya guna pengetahuan yang dihasilkan.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1 Metode Perhitungan

Metode perhitungan yang digunakan dalam pengolahan data untuk mengetahui penyimpangan yang terjadi adalah mean, standard uncertainty, standard uncertainty of the mean, dan overall uncertainty. Perhitungan uncertainty yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada Ernest O. Doebelin [11].

#### 1. Nilai Rata-Rata (*Mean*)

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

Perhitungan ini digunakan untuk mengetahui rata-rata jika kita mengambil data sejumlah  $N$  sehingga data yang akan kita ambil berupa  $X_1$  hingga  $X_N$ . Dalam ilmu statistik nilai rata-rata dapat diketahui dari Persamaan 1. Dimana  $X_i$  adalah banyaknya data yaitu  $X_1, X_2$ , hingga  $X_N$ .

#### 2. *Standard 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.

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

#### 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. Sehingga hasil pengukuran sebenarnya dapat ditulis  $\bar{X} \pm s_x$ . Adapun rumus yang digunakan untuk menghitung rata-rata standar ketidakpastian ini adalah sebagai Persamaan 3.

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

#### 4. *Overall Uncertainty*

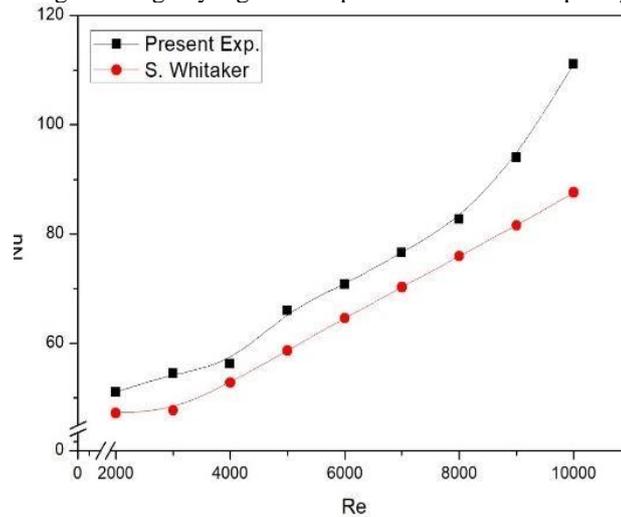
Dalam setiap perhitungan yang melibatkan persamaan tertentu akan melibatkan beberapa komponen yang masing-masing mempunyai ketidakpastian atau *uncertainty*. Contohnya pada perhitungan bilangan Nusselt dimana terdapat komponen-komponen yang termasuk didalamnya misalnya seperti temperatur *inlet*, temperatur *outlet*, luas penampang,

dan lain-lain. 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 sebagai berikut.

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

## 2.2 Data Perhitungan

Untuk memastikan keakuratan eksperimen sekarang ini, hasil eksperimen Whitaker [12] digunakan sebagai pembandingan. Nilai  $Nu$  untuk kasus baseline dengan satu silinder pada rentang  $Re$  dari 2.000 sampai 10.000 dari hasil eksperimen sekarang ini dibandingkan dengan yang dari eksperimen Whitaker seperti yang teramati di Gambar 2.1.



**Gambar 2.1** Validasi studi sekarang ini dengan eksperimen Whitaker

Berdasarkan Gambar 2.1 didapati bahwa kedua hasil eksperimen tersebut memperlihatkan kecenderungan yang sama. Akan tetapi, data hasil pengujian pada studi ini menunjukkan nilai yang lebih tinggi daripada data hasil eksperimen Whitaker. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh induksi panas yang lebih tinggi pada eksperimen sekarang.

## 3. Ketidakpastian Data (Uncertainty)

### 4.1 Ketidakpastian Data Perpindahan Panas

Pada studi ini, untuk mengetahui penyimpangan yang terjadi *mean, standard deviation of the mean*, dan *overall uncertainty* digunakan untuk analisa.

**Tabel 4.1** Data temperatur permukaan silinder 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	49,191	51,214	48,323	49,769	47,802	51,271
2	49,183	51,177	48,316	49,791	47,766	51,264
3	49,145	51,168	48,307	49,753	47,786	51,255
4	49,121	51,173	48,282	49,728	47,761	51,259
5	49,153	51,205	48,285	49,731	47,735	51,262
6	49,100	51,151	48,290	49,736	47,769	51,267
7	49,098	51,150	48,230	49,734	47,738	51,294
8	49,089	51,141	48,250	49,667	47,729	51,228

Data pada Tabel 4.1 dapat digunakan untuk memperoleh temperatur rata-rata permukaan silinder ( $\overline{T_w}$ ) menggunakan Persamaan 5.

$$\overline{T_w} = \frac{\overline{T_{w1}} + \overline{T_{w2}} + \overline{T_{w3}} + \overline{T_{w4}} + \overline{T_{w5}} + \overline{T_{w6}}}{6} \quad (5)$$

Dari Persamaan 8 diperoleh nilai  $\overline{T_w}$  sebesar 49,559 °C. Kemudian, rata-rata standar Ketidakpastiannya dihitung dengan menggunakan Persamaan 6.

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

Nilai  $S_{T_w}$  didapati sebesar  $0,194 \text{ }^\circ\text{C}$ . Sehingga untuk nilai  $\overline{T_w}$  dapat ditulis menjadi  $49,559 \pm 0,194 \text{ }^\circ\text{C}$ . Sedangkan untuk  $\overline{T_{in}}$  dan  $\overline{T_{out}}$  didapati berturut-turut adalah  $28,887^\circ\text{C}$  dan  $32,954^\circ\text{C}$ . Kemudian, rata-rata standar Ketidapastiannya dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 7 dan 8.

$$S_{T_{in}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_{in_i} - \overline{T_{in}})^2}{N(N-1)}} \quad (7)$$

$$S_{T_{out}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_{out_i} - \overline{T_{out}})^2}{N(N-1)}} \quad (8)$$

Sehingga  $S_{T_{in}}$  dan  $S_{T_{out}}$  didapati berturut-turut  $0,012 \text{ }^\circ\text{C}$  dan  $0,045 \text{ }^\circ\text{C}$ . Selanjutnya, nilai  $T_{in}$  dan  $T_{out}$  berturut-turut dapat ditulis menjadi  $28,887 \pm 0,012 \text{ }^\circ\text{C}$  dan  $32,954 \pm 0,045 \text{ }^\circ\text{C}$ . Kemudian, nilai  $Q$  pada kecepatan aliran  $0,4 \text{ m/det}$  didapati  $19,477 \text{ W}$ . Untuk mencari nilai galat pada  $Q$  digunakan Persamaan 9.

$$E_{a_{rssQ}} = \sqrt{\left(\Delta T_{in} \frac{\partial Q}{\partial T_{in}}\right)^2 + \left(\Delta T_{out} \frac{\partial Q}{\partial T_{out}}\right)^2} \quad (9)$$

dimana  $\frac{\partial Q}{\partial T_{in}} = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{in} - T_{out})}{T_{in}}$  sedangkan  $\frac{\partial Q}{\partial T_{out}} = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{in} - T_{out})}{T_{out}}$ . Dengan  $\Delta T_{in} = 0,012 \text{ }^\circ\text{C}$  dan  $\Delta T_{out} = 0,045 \text{ }^\circ\text{C}$  maka diperoleh  $E_{a_{rssQ}}$  sebesar  $0,028 \text{ W}$ . Jadi laju perpindahan panas dapat ditulis menjadi  $Q = 19,477 \pm 0,028 \text{ W}$ . Selanjutnya,  $LMTD$  dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan  $LMTD$  dan nilainya didapati sebesar  $18,564 \text{ }^\circ\text{C}$ . Nilai galat dari  $LMTD$  dihitung menggunakan Persamaan 10 dan nilainya didapati sebesar  $0,077 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$E_{a_{rssLMTD}} = \sqrt{\left(\Delta T_{in} \frac{\partial LMTD}{\partial T_{in}}\right)^2 + \left(\Delta T_w \frac{\partial LMTD}{\partial T_w}\right)^2 + \left(\Delta T_{out} \frac{\partial LMTD}{\partial T_{out}}\right)^2} \quad (10)$$

Sehingga nilai  $LMTD$  dapat ditulis menjadi  $18,564 \pm 0,077 \text{ }^\circ\text{C}$ . Selanjutnya,  $Nu$  diperoleh dari Persamaan  $Nu$  pada kecepatan aliran  $0,4 \text{ m/det}$  dengan nilai  $155,308$ . Perhitungan galat untuk  $Nu$  adalah sebagai berikut.

$$E_{a_{rssNu}} = \sqrt{\left(\Delta LMTD \frac{\partial Nu}{\partial LMTD}\right)^2 + \left(\Delta Q \frac{\partial Nu}{\partial Q}\right)^2} \quad (11)$$

Sehingga nilai galat  $Nu$  didapati sebesar  $0,684$ . Oleh karena itu,  $Nu$  untuk kasus *baseline* dengan kecepatan udara masuk  $0,4 \text{ m/det}$  adalah sebesar  $155,308 \pm 0,684$ .

$$E_{a_{rssh}} = \sqrt{\left(\Delta Nu \frac{\partial h}{\partial Nu}\right)^2} \quad (12)$$

Ketidapastian diperoleh dari koefisien perpindahan panas konveksi sebesar  $0,197 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Selain itu, koefisien perpindahan panas konveksi dapat ditulis sebagai  $h = 44,857 \pm 0,197 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Kemudian, kesalahan koefisien perpindahan panas konveksi dalam bentuk persentase dihitung menjadi  $0,44\%$  menggunakan persamaan 13

$$\% Error_h = \left(\frac{E_{a_{rssh}}}{h}\right) 100\% \quad (13)$$

Metode perhitungan yang sama digunakan untuk semua data. Oleh karena itu, hasil ketidakastian keseluruhan untuk koefisien perpindahan panas konveksi pada data *baseline* dirangkum dalam Tabel 4.2.

**Tabel 4.2.** hasil ketidakastian keseluruhan untuk koefisien perpindahan panas konveksi pada data *baseline*

Ketidakpastian Keseluruhan Perpindahan Panas									
Kecepatan (m/s)	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Error (%)	0,44%	0,47%	0,47%	0,46%	0,55%	0,55%	0,55%	0,55%	0,54%

#### 4.2 Ketidakpastian data *pressure drop*

Pengujian untuk kasus *baseline* dengan kecepatan  $2 \text{ m/det}$  didapatkan data *pressure drop* yang ditunjukkan pada Tabel 4.3. Selanjutnya, dari data tersebut diperoleh rata-rata *pressure drop* dengan nilai  $0,013 \text{ in H}_2\text{O}$  yang dihitung dengan Persamaan 14.

**Tabel 4.3.** Data *pressure drop* dari pengujian *baseline* pada kecepatan aliran 2 m/det

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

$$\overline{\Delta P} = \frac{\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \dots + \Delta P_{30}}{30} \quad (14)$$

Kemudian, rata-rata standar Ketidakpastiannya dihitung menggunakan Persamaan 15 dan diperoleh  $2,1 \times 10^{-5}$  in H<sub>2</sub>O.

$$s_{\Delta P} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta P_i - \overline{\Delta P})^2}{N(N-1)}} \quad (15)$$

Sehingga nilai *pressure drop* untuk kasus *baseline* pada kecepatan masuk 2 m/det adalah sebesar  $0,013 \pm 4,9 \times 10^{-5}$  in H<sub>2</sub>O. Kemudian, *error pressure drop* dihitung dengan Persamaan 16 dan nilainya didapati sebesar 0,47%.

$$\% \text{ Error}_{\Delta P} = \left( \frac{s_{\Delta P}}{\overline{\Delta P}} \right) 100\% \quad (16)$$

Metode perhitungan yang sama digunakan untuk semua data. Oleh karena itu, hasil ketidakpastian keseluruhan untuk koefisien perpindahan panas konveksi pada data *baseline* dirangkum dalam Tabel 4.4.

**Tabel 4.4** Hasil ketidakpastian keseluruhan untuk koefisien perpindahan panas konveksi pada data *baseline*

Ketidakpastian Keseluruhan <i>Pressure Drop</i>									
Kecepatan (m/s)	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Error (%)	0,0%	17,37%	0,0%	3,45%	2,32%	0,0%	0,78%	0,97%	0,71%

## 5. Kesimpulan

Dalam penelitian ini, penyelidikan mengenai ketidakpastian pada aliran fluida melalui tabung di dalam saluran persegi panjang telah menghasilkan pemahaman yang mendalam terkait dengan kompleksitas dan tantangan yang melekat dalam eksperimen mekanika fluida. Analisis ketidakpastian yang dilakukan memberikan dasar penting bagi pemahaman yang lebih mendalam mengenai batasan dan keandalan temuan eksperimental. Berbagai sumber ketidakpastian, termasuk fluktuasi alamiah dalam aliran fluida serta karakteristik geometris dari saluran dan tabung, telah diidentifikasi secara cermat dan dianalisis secara menyeluruh. Hasil penelitian menegaskan bahwa penguasaan yang matang terhadap ketidakpastian bukan hanya meningkatkan validitas hasil eksperimental tetapi juga memberikan landasan yang kokoh bagi peningkatan desain eksperimental di masa yang akan datang. Oleh karena itu, analisis ketidakpastian menjadi suatu keharusan dalam eksperimen mekanika fluida, memainkan peran yang sangat penting dalam membimbing interpretasi yang akurat serta pengambilan keputusan yang terinformasi, dan juga memberikan kontribusi yang signifikan terhadap kemajuan lebih lanjut dalam bidang ilmu rekayasa fluida.

## 6. Daftar Pustaka

- [1] Regales, Enrique Covián, Víctor Puente, Miguel Casero, and Pablo Cienfuegos Suárez. 2023. "Uncertainties Estimation in Surveying Measurands: Application to Volumes." *Measurement Science and Technology*. doi: 10.1088/1361-6501/ad1803.
- [2] Zhang, Haihui, Biao Wu, Cheng-Hui Xia, Lanting Zhang, and Hong Wang. 2024. "Efficient Thermodynamic Model Optimization and Uncertainty Quantification via Integration of Combinatorial Materials Chip and Bayesian Approach." *Scripta Materialia* 243:115977. doi: 10.1016/j.scriptamat.2024.115977.

- [3] Wallach, Daniel, David Makowski, James W. Jones, and François Brun. 2019. "Uncertainty and Sensitivity Analysis." Pp. 209–50 in Elsevier eBooks.
- [4] Coulthard, Tom, and Marco J. Van De Wiel. 2013. "9.34 Numerical Modeling in Fluvial Geomorphology." Pp. 694–710 in Elsevier eBooks.
- [5] Geffray, C., A. Gerschenfeld, Pavel Kudinov, Ignas Mickus, Marti Jeltsov, Kaspar Kööp, Dmitry Grishchenko, and W. David Pointer. 2019. "Verification and Validation and Uncertainty Quantification." Pp. 383–405 in Elsevier eBooks.
- [6] Wate, Parag, Volker Coors, Marco Iglesias, and Darren Robinson. 2019. "Uncertainty Assessment of Building Performance Simulation." Pp. 257–87 in Elsevier eBooks.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Kline, S. J. 1985. "The Purposes of Uncertainty Analysis." *Journal of Fluids Engineering-Transactions of the Asme* 107(2):153–60. doi: 10.1115/1.3242449.
- [10] Macdonald, Iain, and Paul Strachan. 2001. "Practical Application of Uncertainty Analysis." *Energy and Buildings* 33(3):219–27. doi: 10.1016/s0378-7788(00)00085-2.
- [11] S. Whitaker, "Forced convection heat transfer correlations for flow in pipes, past flat plates, single cylinders, single spheres, and for flow in packed beds and tube bundles," *AIChE J.*, vol. 18, no. 2, pp. 361–371, Mar. 1972, doi: 10.1002/aic.690180219.
- [12] Doebelin, E. O., 1990. *Measurement Systems Application And Design*. Singapore: McGraw-Hill.