

Studi Eksperimental Pengaruh Grid Turbulensi dan *Fairing* terhadap Karakteristik Aliran Terowongan Angin Menggunakan Tabung Pitot

Surjo Abadi Kencana Tunggal ^{*1)} 

¹Program Studi Teknik Mesin, Universitas Kristen Indonesia, Kota Jakarta, 13630, Indonesia

*Corresponding author. E-mail: suryo.abadi@uki.ac.id

INFO ARTIKEL

Riwayat Artikel:

Diterima: 13 Maret 2026

Direvisi : 27 April 2026

Disetujui: 29 April 2026

Kata Kunci:

Terowongan angin;
Tabung pitot;
Karakteristik aliran;
Boundary layer;
Turbulensi.

Keywords:

Wind tunnel;
Pitot tube;
Flow characteristic;
Boundary layer;
Turbulence.

ABSTRAK

Kajian karakteristik aliran udara dalam terowongan angin penting untuk berbagai aplikasi rekayasa, khususnya di bidang kedirgantaraan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi distribusi kecepatan, perkembangan lapisan batas, dan pengaruh turbulensi menggunakan tabung Pitot sebagai instrumen sederhana dan andal. Metode eksperimen dilakukan pada terowongan angin sirkuit tertutup dengan pengukuran di beberapa posisi sepanjang arah aliran pada kondisi dengan dan tanpa grid turbulensi. Hasil menunjukkan bahwa kecepatan aliran tidak konstan dan cenderung meningkat ke arah hilir akibat perkembangan lapisan batas. Penggunaan grid turbulensi meningkatkan ketebalan lapisan batas hingga sekitar 2,5 kali serta memicu fluktuasi kecepatan, terutama di bagian awal terowongan. Pemasangan *fairing* terbukti mampu mengurangi deviasi kecepatan secara signifikan, dari sekitar 1 m/s menjadi 0,5 m/s, sehingga meningkatkan keseragaman aliran. Disimpulkan bahwa tabung Pitot dapat digunakan untuk karakterisasi aliran. Temuan ini mengimplikasikan bahwa pengendalian turbulensi dan modifikasi geometri terowongan angin diperlukan untuk meningkatkan kualitas aliran dan akurasi pengukuran aerodinamika.

ABSTRACT

The investigation of airflow characteristics in wind tunnels is essential for various engineering applications, particularly in the aerospace field. This study aims to evaluate velocity distribution, boundary layer development, and the influence of turbulence using a Pitot tube as a simple and reliable instrument. The experimental method was conducted in a closed-circuit wind tunnel with measurements taken at several positions along the flow direction under conditions with and without a turbulence grid. The results show that the airflow velocity is not constant and tends to increase downstream due to boundary layer development. The presence of a turbulence grid increases the boundary layer thickness by approximately 2.5 times and induces velocity fluctuations, particularly near the inlet region. The installation of a fairing is shown to significantly reduce velocity deviation, from approximately 1 m/s to 0.5 m/s, thereby improving flow uniformity. It is concluded that the Pitot tube can be used to characterise the airflow. These findings imply that turbulence control and geometric modification of the wind tunnel are necessary to improve flow quality and the accuracy of aerodynamic measurements.

PENDAHULUAN

Laboratorium Dinamika Fluida di TU/e berpartisipasi dalam program FAR-WAKE Uni Eropa yang mempelajari aspek-aspek fundamental dari pusaran ujung sayap (*trailing vortices*) pesawat udara. Tujuan utama dari kajian ini adalah meningkatkan pemahaman fisik mengenai

evolusi dan peluruhan pusaran ujung sayap (*wake vortex*) di atmosfer ([Dougherty et al., 2004](#)). Untuk mensimulasikan kondisi penerbangan sayap pesawat, digunakan sebuah terowongan angin bernama Goliath.

Terowongan angin tersebut direncanakan untuk digunakan dalam pengamatan fenomena *wing tip vortex* di belakang sayap pesawat dengan menggunakan metode *Particle Image Velocimetry* (PIV). Metode ini memungkinkan visualisasi dan pengukuran medan aliran secara detail, sehingga sangat bergantung pada kualitas dan keseragaman aliran di dalam terowongan angin.

Sebelum pengamatan terhadap pusaran aliran (*wing tip vortex*) dilakukan, uji karakteristik aliran udara di dalam terowongan angin perlu dianalisis terlebih dahulu secara menyeluruh. Tahapan ini bertujuan untuk memastikan bahwa kondisi aliran memenuhi persyaratan eksperimen, sehingga data yang diperoleh melalui metode PIV memiliki tingkat akurasi dan reliabilitas yang tinggi. Oleh karena itu, karakterisasi aliran dilakukan dengan mengukur distribusi kecepatan aliran, mengamati perkembangan lapisan batas (*boundary layer*), serta mengevaluasi pengaruh turbulensi terhadap kestabilan aliran.

Sejumlah penelitian sebelumnya telah mengkaji karakteristik aliran dalam terowongan angin, termasuk distribusi kecepatan, perkembangan lapisan batas, serta pengaruh tingkat turbulensi terhadap kualitas aliran ([Hussain & Ali, 2023](#); [Mioralli & Avallone, 2023](#)). Studi mengenai penggunaan grid turbulensi menunjukkan bahwa perangkat ini mampu menghasilkan kondisi aliran turbulen yang terkendali serta memodifikasi struktur aliran secara signifikan ([Bodenschatz et al., 2014](#); [Cekli & van de Water, 2010](#); [Hearst & Ganapathisubramani, 2017](#)). Di sisi lain, modifikasi geometri terowongan angin, seperti penggunaan fairing atau diffuser, telah dilaporkan dapat mengurangi separasi aliran dan meningkatkan keseragaman distribusi kecepatan ([Mugundhan et al., 2020](#); [H. Wang et al., 2021](#)). Meskipun demikian, kajian yang secara khusus menginvestigasi pengaruh kombinasi grid turbulensi dan fairing terhadap distribusi kecepatan serta perkembangan lapisan batas pada terowongan angin sirkuit tertutup berkecepatan menengah masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini mengisi celah dengan menganalisis secara eksperimental pengaruh kedua faktor tersebut terhadap karakteristik aliran udara di dalam terowongan angin.

Penelitian ini difokuskan pada kajian karakteristik aliran udara di dalam terowongan angin sebagai bagian dari proses kalibrasi sistem. Analisis mencakup distribusi kecepatan aliran, perkembangan lapisan batas (*boundary layer*) ([Hussain & Ali, 2023](#)), serta tingkat turbulensi secara sistematis. Seluruh pengujian dilakukan menggunakan terowongan angin sirkuit tertutup berkecepatan menengah tipe Goliath yang berada di Laboratorium Dinamika Fluida TU Eindhoven. Terowongan angin tersebut dilengkapi dengan *turbulence grid* yang dipasang pada bagian depan untuk menghasilkan kondisi aliran turbulen yang dapat dikendalikan, serta modifikasi geometri berupa *fairing* untuk meningkatkan keseragaman aliran.

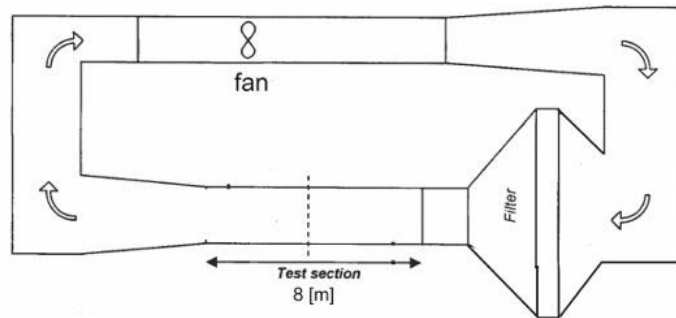
METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan secara eksperimen di fasilitas terowongan angin. Pengukuran kecepatan aliran dilakukan menggunakan tabung pitot dengan instrumen sederhana, andal, dan berbiaya rendah dalam memperoleh profil kecepatan. Instrumen ini diletakkan pada beberapa titik pengamatan (stasiun) di dalam terowongan angin. Metode ini memungkinkan diperolehnya data yang merepresentasikan kondisi aliran aktual sehingga karakteristik aliran dapat dianalisis.

Susunan dan Peralatan Eksperimen Terowongan Angin

Terowongan angin Goliath merupakan terowongan angin sirkuit tertutup yang memiliki bagian uji dengan panjang 8 meter, lebar 0,7 meter, dan tinggi 1,05 meter, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Pada kedua sisi bagian uji dipasang panel geser dari bahan plexiglass yang dapat dilepas dengan mudah, sehingga memungkinkan akses visual secara langsung selama proses pengukuran. Kecepatan

aliran udara di dalam terowongan angin diatur menggunakan sebuah kipas yang terhubung dengan motor berkecepatan variabel, yang dapat dioperasikan pada rentang putaran antara 0 hingga 560 rpm.



Gambar 1. Skema konfigurasi terowongan angin Goliath.

Terowongan angin yang digunakan dalam penelitian ini mampu menghasilkan kecepatan aliran maksimum hingga sekitar 20 m/s. Terowongan ini juga dapat dilengkapi dengan grid aktif, yaitu perangkat pembangkit turbulensi yang digerakkan oleh motor listrik untuk menghasilkan kondisi aliran turbulen seperti Gambar 2.



Gambar 2. Grid batang dipasang pada bagian awal terowongan angin untuk menghasilkan kondisi aliran turbulen.

Grid standar yang digunakan tersusun atas batang-batang silinder dengan diameter 1 cm dan jarak antar batang (*mesh size*) sebesar 10 cm. Grid aktif ini bertujuan memungkinkan studi efek turbulensi yang terkendali pada berbagai kondisi aliran, termasuk intensitas turbulensi ([Bodenschatz et al., 2014](#); [Hearst & Ganapathisubramani, 2017](#); [Nasrollahi & Yazdi, 2024](#)). Dalam penelitian ini, grid dioperasikan dalam dua konfigurasi, yaitu dilepas sepenuhnya sehingga aliran tidak mengalami gangguan tambahan, atau dipasang dalam mode pasif tanpa penggerak aktif.

Untuk keperluan pengukuran, digunakan sistem koordinat Kartesius O (x, y, z) dengan titik asal terletak pada pusat penampang lintang di bagian depan terowongan angin. Sumbu x didefinisikan sejajar dengan arah aliran utama dan mengarah ke hilir (*downstream*). Sumbu z berorientasi vertikal ke atas, sedangkan sumbu y berada pada arah horizontal dan tegak lurus terhadap dinding samping terowongan angin.

Bagian uji (*test section*) dari terowongan angin dibagi menjadi empat stasiun pengukuran sepanjang arah aliran. Pada masing-masing stasiun, kecepatan aliran udara diukur menggunakan tabung pitot-statik dengan mempertimbangkan variasi kecepatan putar motor penggerak. Pengujian dilakukan pada dua kondisi utama, yaitu dengan dan tanpa pemasangan grid. Ringkasan posisi stasiun pengukuran serta kondisi eksperimen yang diterapkan diperlihatkan pada Tabel 1. Seluruh pengujian dilaksanakan dengan memvariasikan kecepatan putar motor dalam rentang 80 hingga 560 rpm, dengan step 40 rpm, setiap posisi dilakukan 1 kali pengukuran dalam waktu 1 menit.

Tabel 1. Kondisi eksperimen untuk pengukuran kecepatan aliran angin.

No. Eksperimen	Posisi Pengukuran x (m)	Kondisi Grid
1	0,68	Tanpa grid
2	2,56	Tanpa grid
3	5,12	Tanpa grid
4	7,61	Tanpa grid
5	0,68	Dengan grid
6	2,56	Dengan grid
7	5,12	Dengan grid
8	7,61	Dengan grid

Tabung Pitot

Untuk mengukur kecepatan aliran udara di dalam terowongan angin, digunakan sebuah tabung Pitot yang dipasang pada dinding atas bagian uji dan diarahkan sejajar dengan arah aliran utama. Meskipun konstruksinya sederhana, tabung Pitot masih banyak digunakan dalam eksperimen dinamika fluida karena prinsip pengukurannya yang andal serta kemampuannya memberikan pengukuran kecepatan aliran yang akurat melalui pengukuran tekanan diferensial ([Mioralli & Avallone, 2023](#)). Instrumen ini bekerja dengan mengonversi energi kinetik aliran menjadi energi potensial pada titik stagnasi ([Tavoularis & Nedić, 2024](#)). Kecepatan aliran kemudian ditentukan dari selisih antara tekanan total dan tekanan statik berdasarkan persamaan Bernoulli, sebagaimana dinyatakan pada Persamaan 1.

$$U_{\infty} = \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

Dalam hal ini, U_{∞} menyatakan kecepatan aliran utama, ΔP merupakan selisih tekanan antara tekanan statik yang diukur sedangkan ρ menyatakan massa jenis udara.

Sistem Akuisisi Data

Tabung pitot yang telah dijelaskan pada subbagian sebelumnya dihubungkan dengan sensor tekanan. Baratron dan transduser tekanan MKS digunakan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Transduser tekanan merupakan perangkat sensor yang berfungsi untuk mengukur tekanan fluida dan mengubahnya menjadi sinyal listrik yang dapat direkam serta dianalisis oleh sistem pengukuran. Dalam eksperimen terowongan angin, sensor ini digunakan untuk mendeteksi tekanan statik dan tekanan total yang diperoleh dari tabung pitot, sehingga perbedaan tekanan tersebut dapat digunakan untuk menentukan kecepatan aliran udara. Sensor Baratron dikenal memiliki tingkat akurasi yang tinggi untuk pengukuran tekanan rendah, sedangkan transduser tekanan MKS banyak digunakan dalam eksperimen dinamika fluida karena stabilitas dan sensitivitasnya yang baik ([Gluzman et al., 2021](#)).

**Gambar 3.** Sensor tekanan (Baratron) dan transduser tekanan MKS.

Baratron yang digunakan adalah model 698A yang dikombinasikan dengan transduser tekanan MKS model 670B, yang dilengkapi dengan tampilan elektronik untuk pembacaan tekanan. Transduser MKS memiliki rentang pengukuran 0,1 hingga 25.000 mmHg, resolusi sebesar 1×10^{-5} mmHg dari skala penuh, serta waktu respons masing-masing 1, 40, dan 400 milidetik. Transduser tekanan ini menghasilkan sinyal keluaran analog dalam rentang 0 hingga ± 10 volt DC. Untuk menentukan kecepatan aliran udara di dalam terowongan angin, sinyal keluaran analog tersebut dikonversi menjadi nilai kecepatan dalam satuan meter per detik. Proses konversi dilakukan dengan menghubungkan transduser tekanan secara paralel dengan manometer Benson. Hubungan antara sinyal keluaran analog (mV) dan tekanan yang terukur (mmH₂O) ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hubungan antara keluaran transduser tekanan P_1 (mV) dan pembacaan manometer Benson P_2 (mmH₂O).

Variabel	1	2	3	4	5	6	7
P_1 (mV)	0,0087	0,0130	0,0196	0,0257	0,0361	0,0461	0,0554
P_2 (mmH ₂ O)	0,20	0,22	0,39	0,41	0,59	0,70	0,80

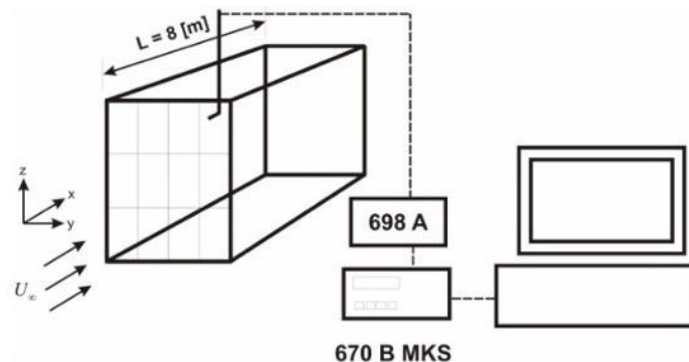
Berdasarkan penerapan metode kuadrat terkecil (*least squares*) (Hernández Vásquez et al., 2023), hubungan antara keluaran analog transduser tekanan dan pembacaan manometer Benson diperoleh dalam bentuk persamaan linear sebagai berikut:

$$P_2 = 13,827 P_1 + 0,0730. \quad (2)$$

Selanjutnya, nilai tekanan P_2 yang masih dalam satuan mmH₂O dikonversi ke dalam satuan Pascal (Pa) menggunakan hubungan tekanan hidrostatik. Konversi ini dilakukan dengan asumsi massa jenis air sebesar $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$ dan percepatan gravitasi $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ sehingga diperoleh: $1 \text{ mmH}_2\text{O} = 9,78 \text{ Pa}$. Dalam perhitungan kecepatan aliran, massa jenis udara yang digunakan adalah $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$, yang diasumsikan pada kondisi udara standar.

Experimental setup

Pengaturan dan pengujian peralatan dilakukan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4. Pengukuran kecepatan aliran udara menggunakan tabung pitot dilaksanakan pada empat posisi berbeda, yaitu $x = 0,68 \text{ m}$; $2,56 \text{ m}$; $5,12 \text{ m}$; dan $7,61 \text{ m}$. Selama proses pengukuran, kecepatan aliran di dalam terowongan angin divariasikan dengan mengubah kecepatan putar kipas pada rentang 80 hingga 560 rpm, sebagaimana tercantum pada Tabel 1. Data yang diperoleh dari setiap variasi kecepatan dan posisi pengukuran kemudian dianalisis untuk mengevaluasi distribusi kecepatan aliran sepanjang arah aliran. Pengukuran kecepatan pada setiap stasiun dilakukan setelah kondisi aliran mencapai keadaan tunak (*steady-state*), yang ditandai dengan kestabilan pembacaan tekanan. Data yang dicatat merepresentasikan kondisi aliran yang stabil.

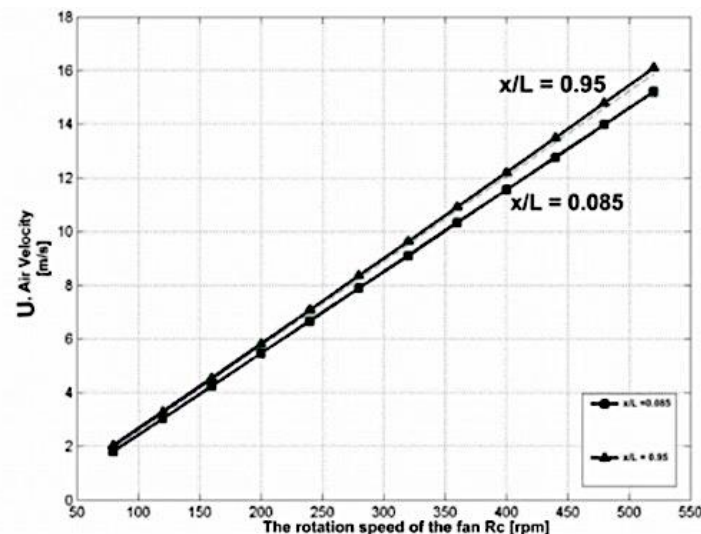


Gambar 4. Skema tata letak eksperimen. Kotak sebelah kiri adalah Terowongan Angin, dengan tabung Pitot di atasnya. Tabung Pitot disambungkan dengan sensor tekanan MKS 698 A, kemudian dihubungkan dengan Transduser tekanan Baratron. Untuk merekam hasil pengukuran digunakan sebuah PC.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kecepatan Angin

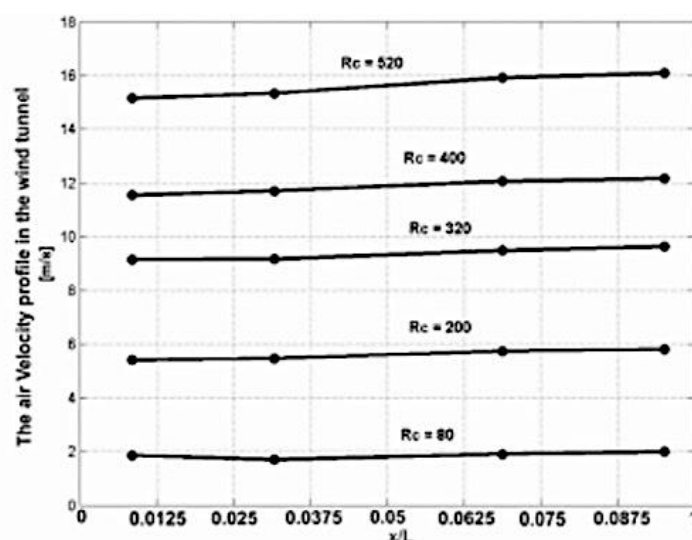
Gambar 5 menunjukkan hasil pengukuran kecepatan angin pada eksperimen yang dilakukan dengan pemasangan *turbulent* grid di dalam terowongan angin. Posisi setiap stasiun jaraknya dinormalisasi terhadap panjang terowongan $L=8$ m, sehingga dinyatakan dalam bentuk rasio x/L .



Gambar 5. Kecepatan aliran pada dua posisi berbeda, $x/L = 0,085$ dan $x/L = 0,95$.

Gambar 5 memperlihatkan hubungan antara kecepatan putar motor R_c , pada sumbu horizontal dan kecepatan angin rata-rata $\langle U_\infty \rangle$, pada sumbu vertikal, pada dua posisi pengamatan yang berbeda. Dari gambar tersebut, terlihat adanya penyimpangan kecepatan ΔU pada stasiun pertama ($x/L=0.085$) dan stasiun terakhir ($x/L=0.95$). Hal ini sejalan dengan praktik umum di mana profil aliran dan *boundary-layer* berkembang sepanjang lintasan aliran di terowongan angin dengan adanya grid turbulensi (Neuhaus et al., 2021; Szaszák et al., 2018). Penyimpangan ini menunjukkan kecepatan aliran dalam terowongan angin tidak konstan.

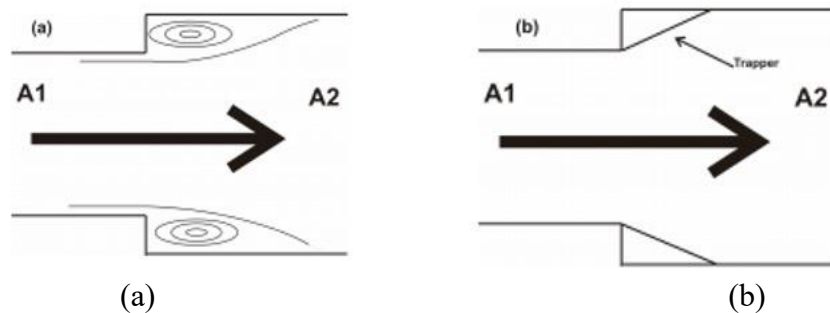
Untuk lebih jelasnya perubahan kecepatan dari satu stasiun ke stasiun lain dengan berbagai nilai putaran motor R_c , diperlihatkan pada Gambar 6. Sumbu horizontal pada gambar tersebut adalah posisi stasiun x/L sedangkan sumbu vertikal merepresentasikan kecepatan aliran.



Gambar 6. Perbedaan kecepatan ΔU di dalam terowongan angin dengan berbagai nilai R_c .

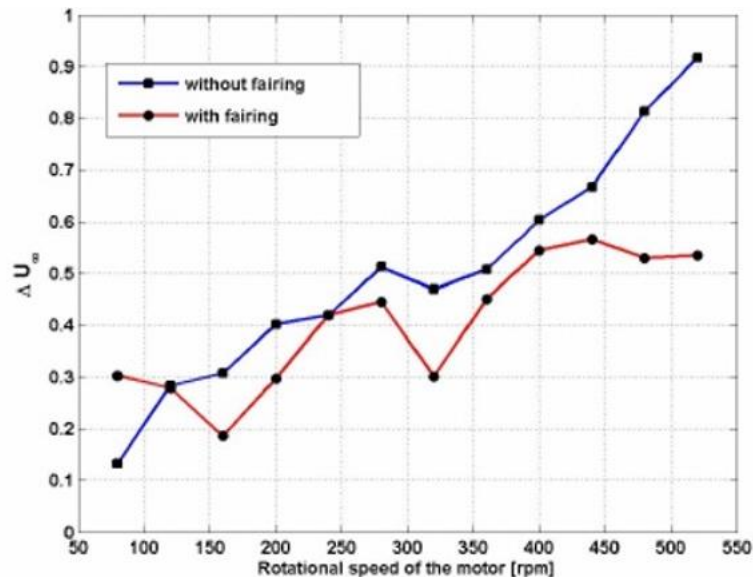
Gambar 6 memperlihatkan kecepatan aliran dari satu posisi ke posisi lainnya tidak bernilai konstan, melainkan sedikit meningkat ke arah hilir (*downstream*). Gambar tersebut juga menunjukkan bahwa

penyimpangan yang lebih besar terjadi pada nilai R_c yang lebih besar. Hal ini disebabkan adanya perubahan penampang terowongan angin yang membesar secara tiba-tiba, setelah grid, seperti diperlihatkan pada Gambar 7(a).



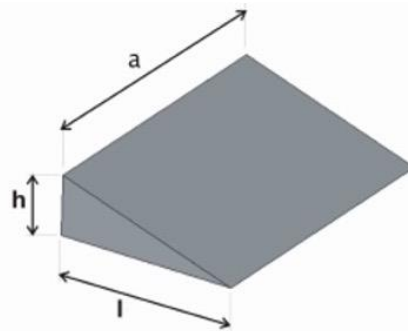
Gambar 7. a) Pembesaran penampang saluran yang menghasilkan daerah resirkulasi aliran; b) pemasangan pengisi (*firing*) pada bagian atas dan bawah *test section*

Dengan bentuk penampang seperti ini, terjadi pemisahan aliran (*flow separation*), dan area pojok terowongan yang membesar, menghasilkan daerah aliran resirkulasi. Ekspansi mendadak ini memicu gerakan pusaran tak tunak (*unsteady eddies*) yang lebih besar, menyebabkan lapisan batas pada dinding terowongan menjadi lebih tebal (Sarkar & Roy, 2024). Akibat meningkatnya efek perpindahan (*displacement effect*) dari lapisan batas pada dinding terowongan, luas penampang efektif terowongan berkurang ke arah hilir, sehingga kecepatan aliran meningkat, hal ini sesuai dengan prinsip Bernoulli. Untuk mencegah terbentuknya aliran yang terpisah dan daerah resirkulasi pada bagian langkah yang menghadap ke belakang (*backward-facing step*) setelah *turbulent grid*, dipasang dua *firing* pada bagian bawah dan bagian atas *inlet test section*, seperti ditunjukkan pada Gambar 7b). Pengaruh dari *firing* ini dapat dilihat pada Gambar 8. Nilai maksimum penyimpangan kecepatan ΔU ketika *firing* dipasang lebih kecil dibandingkan dengan kondisi terowongan angin tanpa *firing*.



Gambar 8. Hasil pengukuran penyimpangan kecepatan antara stasiun 4 dan stasiun 1. Garis biru menunjukkan hasil pengukuran yang dilakukan tanpa *firing*, sedangkan garis merah menunjukkan hasil pengukuran dengan pemasangan *firing*.

Efek ini konsisten dengan temuan bahwa modifikasi geometri *inlet/diffuser* dapat menunda pemisahan dan memperbaiki distribusi kecepatan serta mengurangi ketebalan *boundary layer* di dinding terowongan (Mugundhan et al., 2020). Adapun bentuk dan dimensi dari *firing* yang ditambahkan dapat dilihat pada Gambar 9.



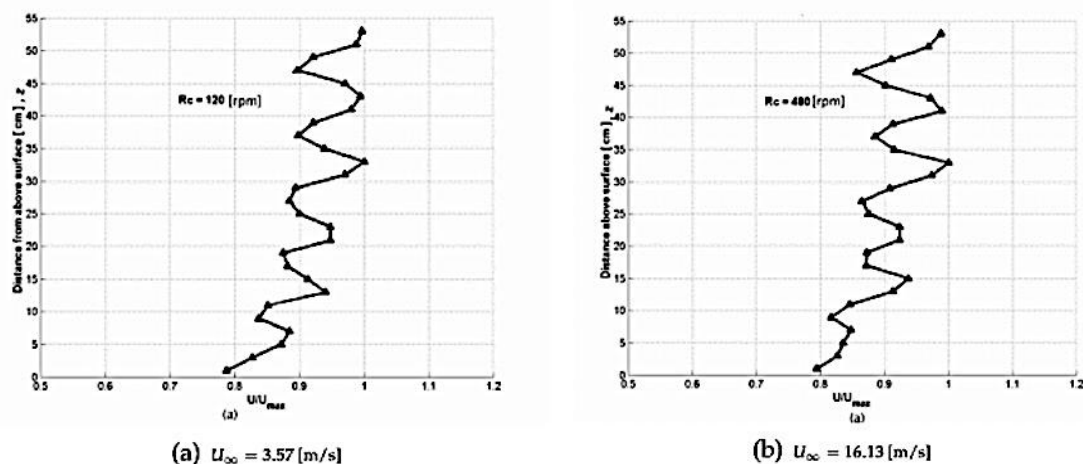
Gambar 9. Dimensi pengisi (*fairing*) yang digunakan yaitu $h = 2,5$ cm, $l = 20,5$ cm, dan $a = 70$ cm.

Nilai maksimum penyimpangan kecepatan pada terowongan angin tanpa *fairing* mencapai sekitar 1 m/s, sedangkan setelah *fairing* dipasang nilai tersebut menurun menjadi sekitar 0,50 m/s. Fenomena ini sejalan dengan temuan bahwa penghalang/*fairing* dapat mengurangi drag dan mereduksi layer boundary melalui peningkatan aliran vena lokal serta restriksi aliran di dinding, sehingga menurunkan variasi kecepatan ekstrem di daerah uji ([Della Corte et al., 2021](#); [J. Wang, 2021](#)).

Profil Kecepatan Angin di Dalam Terowongan

Profil kecepatan udara sebagai fungsi jarak terhadap dinding, $U=f(z)$, juga dianalisis dalam penelitian ini. Pengukuran dilakukan menggunakan tabung pitot–statik pada interval setiap 2 cm dari bagian atas (*ceiling*) terowongan angin. Eksperimen dilakukan pada stasiun 1, 2, dan 4 untuk dua kondisi kecepatan aliran utama, yaitu 3.57 m/s dan 16.13 m/s. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa ketebalan lapisan batas secara eksperimen, δ_{exp} , pada dinding atas meningkat sepanjang arah aliran (*streamwise direction*). Hal ini menunjukkan perkembangan lapisan batas akibat efek viskositas dan interaksi antara aliran utama dengan dinding terowongan. Pada setiap grafik, sumbu vertikal menyatakan jarak tabung Pitot terhadap langit-langit terowongan, sedangkan sumbu horizontal menunjukkan kecepatan aliran U yang telah dinormalisasi terhadap U_{max} , yaitu kecepatan aliran utama di tengah terowongan ($z=0$).

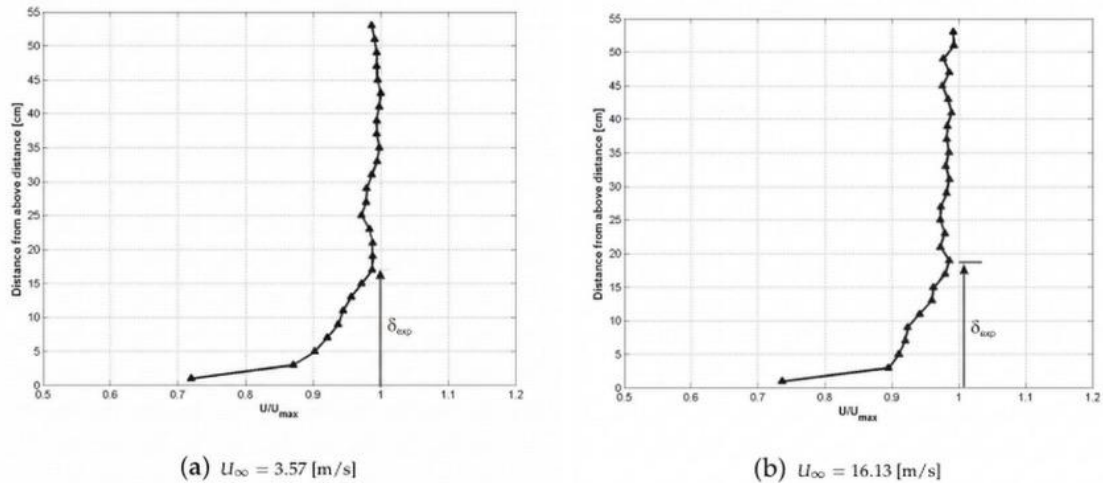
Efek dari turbulensi dapat terlihat pada setiap hasil pengukuran, yang diperlihatkan pada Gambar 10, 11, dan 12. Gambar-gambar tersebut menunjukkan adanya fluktuasi distribusi kecepatan, khususnya pada stasiun 1 yang berlokasi dekat dengan turbulent grid. Ketidakteraturan profil kecepatan ini disebabkan oleh struktur turbulensi yang dihasilkan oleh grid, yang masih cukup kuat pada bagian awal terowongan. Grid menghasilkan *wake* dan *vorteks* kecil di belakang batang-batangannya ([Cekli & Van De Water, 2010](#)), sehingga aliran belum sepenuhnya berkembang menjadi profil yang lebih homogen. Seiring bertambahnya jarak dari grid menuju arah hilir, efek turbulensi tersebut secara bertahap mengalami difusi dan peluruhan energi, sehingga profil kecepatan menjadi lebih halus dan lapisan batas semakin berkembang.



Gambar 10. Distribusi profil kecepatan vertikal pada stasiun 1 untuk kecepatan aliran utama a) 3,57 m/s dan b) 16,13 m/s.

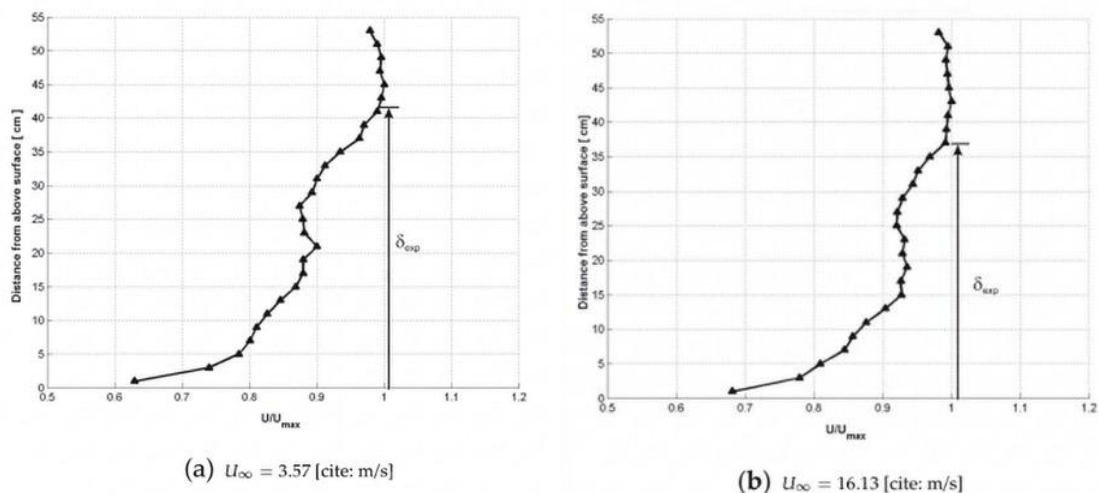
Selain itu, perbandingan antara dua kondisi kecepatan aliran menunjukkan bahwa pada kecepatan yang lebih tinggi (16.13 m/s) profil kecepatan cenderung lebih stabil dan lebih terdefinisi dibandingkan pada kecepatan rendah (3.57 m/s). Hal ini berkaitan dengan meningkatnya bilangan Reynolds, yang memperkuat pencampuran turbulen dan mempercepat perkembangan lapisan batas di sepanjang dinding terowongan

Pengaruh grid terhadap profil kecepatan menjadi semakin berkurang sepanjang arah aliran, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 11 (a) dan (b). Gambar tersebut menunjukkan profil kecepatan udara vertikal pada stasiun 2, dan dapat dilihat bahwa ketebalan lapisan batas δ_{exp} eksperimen sekitar 17 cm untuk kecepatan terowongan $U_{\infty} = 3.57$ m/s. dan $\delta_{exp} \approx 20$ cm untuk $U_{\infty} = 16.13$ m/s.



Gambar 11. Distribusi profil kecepatan vertikal pada stasiun 2 untuk dua kondisi kecepatan aliran utama a) $U_{\infty}=3,57$ m/s dan b) $U_{\infty}=16,13$ m/s.

Profil kecepatan menunjukkan bahwa pengaruh grid turbulen semakin berkurang sepanjang arah aliran. Dari profil ini diperoleh ketebalan lapisan batas eksperimen sekitar $\delta_{exp} \approx 17$ cm pada $U_{\infty}=3,57$ m/s dan sekitar $\delta_{exp} \approx 20$ cm pada $U_{\infty}=16,13$ m/s. Profil kecepatan pada stasiun terakhir (bagian belakang terowongan) ditunjukkan pada Gambar 12.

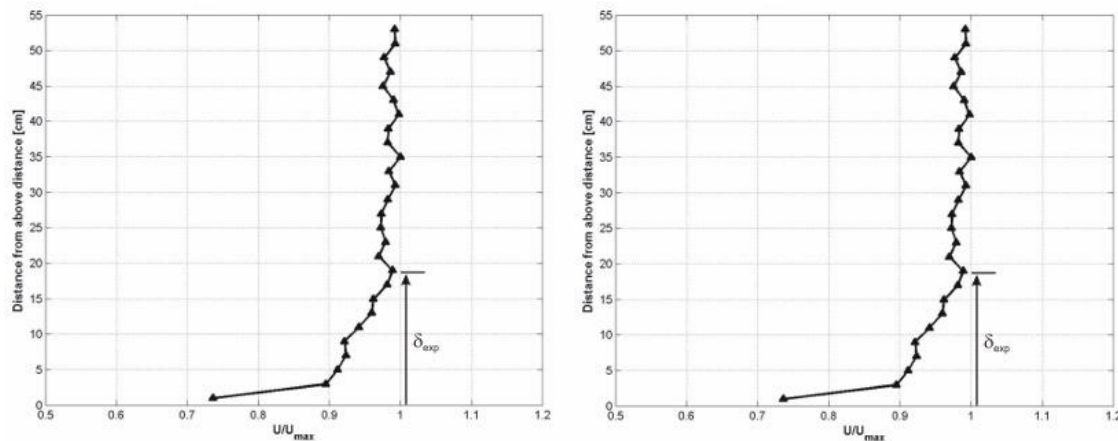


Gambar 12. Profil kecepatan vertikal aliran udara pada stasiun terakhir (bagian belakang terowongan): a) $U_{\infty} = 3,57$ m/s dan b) $U_{\infty} = 16,13$ m/s

Distribusi kecepatan menunjukkan profil yang lebih halus dengan ketebalan lapisan batas eksperimen sekitar $\delta_{exp} \approx 40$ cm. Distribusi kecepatan pada bagian ini terlihat jauh lebih halus. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa U/U_{max} berubah dengan cepat pada rentang $z = 0$ cm hingga $z = 20$ cm. Ketika $z > 20$ cm, variasi nilai U/U_{max} berada pada kisaran 0,9 hingga 1. Nilai U/U_{max} semakin

mendekati 1 ketika tabung Pitot mencapai jarak sekitar 40 cm dari bagian atas (*ceiling*) terowongan. Berdasarkan hal ini dapat disimpulkan bahwa ketebalan lapisan batas eksperimen δ_{exp} untuk kedua kecepatan terowongan angin tersebut berada pada kisaran sekitar 40 cm.

Hasil profil kecepatan angin selanjutnya ditunjukkan pada Gambar 14 pada a) kondisi tanpa pemasangan grid turbulensi, ketebalan lapisan batas secara eksperimental (δ_{exp}) jauh lebih tipis dibandingkan dengan kondisi ketika b) grid terpasang.



Gambar 14: Profil kecepatan vertikal aliran udara a) kondisi terowongan tanpa grid, dan b) kondisi grid dipasang di dalam terowongan. Kedua percobaan dilakukan pada posisi $x = 2.56$ m. Kecepatan putar motor pada kedua percobaan tersebut adalah $Rc = 480$ rpm.

Dari kedua gambar di atas, ketebalan lapisan batas dapat diestimasi secara visual untuk masing-masing kondisi. Gambar 14a) menunjukkan bahwa nilai δ_{exp} berada pada kisaran sekitar 8 cm, sedangkan pada Gambar 14b) ketebalan lapisan batas meningkat hingga sekitar 20 cm. Fenomena serupa telah dilaporkan pada studi yang membahas bagaimana peningkatan tingkat turbulensi dan perubahan geometri memodulasi boundary layer dan profil kecepatan (French et al., 2021).

Ketebalan lokal lapisan batas δ pada kondisi turbulen secara teoritis dapat ditentukan menggunakan hubungan Persamaan 3.

$$\frac{\delta}{x} = 0.37 Re_x^{(-1/5)} \quad (3)$$

Dengan Re_x merupakan bilangan Reynolds lokal yang didefinisikan sebagai Persamaan 4

$$Re_x = U_\infty x / \nu \quad (4)$$

Di mana U_∞ menyatakan kecepatan aliran utama, ν adalah viskositas kinematik udara, dan x merupakan jarak antara posisi tabung pitot dan sisi masuk bagian uji terowongan angin. Nilai ketebalan lapisan batas secara teoritis (δ) dapat dihitung dengan mensubstitusikan data eksperimen ke dalam Persamaan (3), kemudian dibandingkan dengan ketebalan lapisan batas hasil pengukuran eksperimental (δ_{exp}), sebagaimana dirangkum pada Tabel 3.

Tabel 3. Data hasil pengukuran dan ketebalan lapisan batas pada stasiun 2.

Kondisi	x (m)	U_∞ (m/s)	ν (m ² /s)	Re_x ($\times 10^6$)	δ teoritis (cm)	δ_{exp} (cm)
Dengan grid	2,56	16,30	$1,51 \times 10^{-5}$	2,76	4,88	20
Tanpa grid	2,56	17,50	$1,51 \times 10^{-5}$	2,97	4,81	8

Hasil perhitungan teoritis ketebalan lapisan batas (δ) pada Tabel 3 belum menunjukkan kesesuaian yang sempurna dengan hasil eksperimen (δ_{exp}). Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh kondisi awal aliran, di mana lapisan batas telah terbentuk sebelum memasuki bagian uji terowongan angin. Dengan

demikian, asumsi teoritis mengenai perkembangan lapisan batas dari titik awal x tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi aktual di dalam terowongan.

Berdasarkan Tabel 3, ketebalan lapisan batas pada kondisi dengan grid turbulensi $\delta(exp) = 20$ cm, lebih besar dibandingkan tanpa grid $\delta(exp) = 8$ cm, atau meningkat sekitar 2,5 kali. Namun, kedua kondisi ini tidak diuji pada kecepatan aliran bebas yang sama, yaitu 16,30 m/s (dengan grid) dan 17,50 m/s (tanpa grid). Perbedaan kecepatan ini memengaruhi bilangan Reynolds dan perkembangan lapisan batas. Dari eksperimen ini terlihat grid turbulensi dapat meningkatkan intensitas turbulensi dan mempercepat pertumbuhan lapisan batas.

KESIMPULAN

Penelitian ini memiliki keterbatasan berupa jumlah sampel yang terbatas serta pengukuran. Tabung Pitot digunakan sebagai instrumen pengukuran kecepatan aliran udara di dalam terowongan angin karena kemudahan penggunaannya. Berdasarkan hasil pengukuran, fluktuasi kecepatan aliran cenderung berkurang ke arah hilir, sejalan dengan perkembangan lapisan batas sepanjang arah aliran. Pemasangan fairing di belakang grid turbulensi menunjukkan adanya penurunan variasi kecepatan di dalam terowongan, dari 1 m/s menjadi 0,5 m/s. Selain itu, ketebalan lapisan batas yang terukur pada kondisi dengan grid lebih besar dibandingkan tanpa grid. Namun, perbedaan ini perlu diinterpretasikan secara hati-hati karena kondisi pengujian tidak sepenuhnya identik, khususnya dalam hal kecepatan aliran bebas. Hasil ini mengindikasikan bahwa keberadaan grid turbulensi berkontribusi terhadap perubahan karakteristik aliran dan pertumbuhan lapisan batas pada dinding terowongan.

REFERENSI

- Bodenschatz, E., Bewley, G. P., Nobach, H., Sinhuber, M., & Xu, H. (2014). Variable density turbulence tunnel facility. *Review of Scientific Instruments*, 85(9). <https://doi.org/10.1063/1.4896138>
- Cekli, H. E., & van de Water, W. (2010). Tailoring turbulence with an active grid. *Experiments in Fluids*, 49(2), 409–416. <https://doi.org/10.1007/s00348-009-0812-5>
- Della Corte, B., van Sluis, M., Veldhuis, L. L. M., & Gangoli Rao, A. (2021). Power Balance Analysis Experiments on an Axisymmetric Fuselage with an Integrated Boundary-Layer-Ingesting Fan. *AIAA Journal*, 59(12), 5211–5224. <https://doi.org/10.2514/1.J060570>
- Dougherty, R., Wang, F., Booth, E., Watts, M., Fenichel, N., & D'Errico, R. (2004, May 10). Aircraft Wake Vortex Measurements at Denver International Airport. *10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. <https://doi.org/10.2514/6.2004-2880>
- French, A., Friess, W., Goupee, A., & Berube, K. (2021). Design, Construction and Evaluation of an Oscillating Vane Gust Generator for Atmospheric Flow Simulation. *Wind*, 1(1), 63–76. <https://doi.org/10.3390/wind1010004>
- Gluzman, I., Cohen, J., & Oshman, Y. (2021). Blind disturbance separation and identification in a transitional boundary layer using minimal sensing. *Journal of Fluid Mechanics*, 927, A4. <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.733>
- Hearst, R. J., & Ganapathisubramani, B. (2017). Tailoring incoming shear and turbulence profiles for lab-scale wind turbines. *Wind Energy*, 20(12), 2021–2035. <https://doi.org/10.1002/we.2138>
- Hernández Vásquez, J. D., Pedraza Yepes, C. A., Vitola Galvis, M. A., Fong Silva, W., & Higuera Cobos, O. F. (2023). Application of the method of ordinary least squares in the calibration of temperature, pressure and mass meters. *Investigación e Innovación En Ingenierías*, 11(1), 22–33. <https://doi.org/10.17081/invinno.11.1.6060>
- Hussain, I. Y., & Ali, A. H. (2023). Testing and Commissioning of a Low-Speed Wind Tunnel (LSWT) Test Section. *Journal of Engineering*, 20(11), 106–125. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2014.11.08>
- Mioralli, P. C., & Avallone, E. (2023). Construction of a Didactic Wind Tunnel as a Pedagogical Application in Technical Education. *Educação Em Revista*, 39. <https://doi.org/10.1590/0102-469839236t>
- Mugundhan, V., Pugazenthi, R. S., Speirs, N. B., Samtaney, R., & Thoroddsen, S. T. (2020). The alignment of vortical structures in turbulent flow through a contraction. *Journal of Fluid Mechanics*, 884, A5. <https://doi.org/10.1017/jfm.2019.887>

- Nasrollahi, S., & Yazdi, S. R. S. (2024). *Effects of Various Air Flow Modification Techniques on Design and Development of a Multi-fan Blower Type Open-Section Civil Wind Tunnel*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4067926/v1>
- Neuhaus, L., Berger, F., Peinke, J., & Hölling, M. (2021). Exploring the capabilities of active grids. *Experiments in Fluids*, 62(6), 130. <https://doi.org/10.1007/s00348-021-03224-5>
- Sarkar, N., & Roy, S. (2024). Periodic flow features in a planar sudden expansion with pulsatile inflow velocity. *Journal of Fluid Mechanics*, 980, A43. <https://doi.org/10.1017/jfm.2023.1074>
- Szaszák, N., Roloff, C., Bordás, R., Bencs, P., Szabó, S., & Thévenin, D. (2018). A novel type of semi-active jet turbulence grid. *Heliyon*, 4(12), e01026. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e01026>
- Tavoularis, S., & Nedić, J. (2024). *Measurement in Fluid Mechanics*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009343657>
- Wang, H., Li, H., & He, X. (2021). Aerodynamics of a Train and Flat Closed-Box Bridge System with Train Model Mounted on the Upstream Track. *Applied Sciences*, 12(1), 276. <https://doi.org/10.3390/app12010276>
- Wang, J. (2021). Experimental design for verification and validation of harmonic vibration control systems. *Noise Control Engineering Journal*, 69(5), 460–465. <https://doi.org/10.3397/1/376942>