

**DESAIN DAN ANALISIS MODIFIKASI DARI INVELOX DENGAN DOUBLE
INTAKE DAN COVER ROUNDED LIP DI ATAS INTAKE**

Vannes Chrisdaniel Junior

S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
Email: vanneschrisdaniel.21038@mhs.unesa.ac.id

Dr. A. Grummy Wailanduw, M.Pd., M.T.

Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
Email: grummywailanduw@unesa.ac.id

Abstrak

Potensi energi angin di Indonesia sangat besar, namun pemanfaatannya masih sangat terbatas. Salah satu teknologi yang dikembangkan untuk mengoptimalkan pemanfaatan energi angin adalah Invelox, yakni sistem penangkap dan pengarah aliran angin. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh modifikasi desain Invelox menggunakan konfigurasi Double Intake dan Cover Rounded Lip terhadap peningkatan kinerja aliran udara pada saluran Venturi. Penelitian ini dilaksanakan melalui simulasi numerik di laboratorium berbasis perangkat lunak ANSYS Fluent, dengan metode penelitian eksperimen. Subjek penelitian adalah variasi desain Invelox: Base, Cover Rounded Lip, Double Intake, serta kombinasi keduanya. Data dikumpulkan melalui simulasi dengan parameter kecepatan, tekanan, kontur, dan streamline. Teknik analisis yang digunakan meliputi perbandingan nilai rata-rata dan maksimum kecepatan serta tekanan pada masing-masing desain. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi modifikasi mampu meningkatkan kecepatan aliran dengan memperbesar volume udara masuk dan mengarahkan aliran secara lebih halus. Namun, bentuk lengkung pada Cover Rounded Lip cenderung menyebarkan arah aliran, sehingga sebagian energi tidak sepenuhnya terfokus. Penelitian ini menyimpulkan bahwa Double Intake lebih efektif dalam meningkatkan kecepatan aliran, sedangkan Cover Rounded Lip mendukung dari sisi pengendalian arah tetapi memiliki keterbatasan dalam konsentrasi aliran. Penelitian selanjutnya disarankan mengeksplorasi bentuk Elbow dan Cover lebih lanjut untuk meminimalkan kehilangan energi aliran.

Kata Kunci: energi angin, invelox, simulasi CFD, Double Intake, Cover Rounded Lip, efisiensi aliran

Abstract

Indonesia has vast wind energy potential, yet its utilization remains very limited. One of the technologies developed to optimize the use of wind energy is Invelox, a system designed to capture and direct airflow. This study aims to analyze the effect of design modifications to the Invelox system using Double Intake and Cover Rounded Lip configurations on the improvement of airflow performance in the Venturi section. The research was conducted through numerical simulations in a laboratory setting using ANSYS Fluent software, applying an experimental research method. The study involved four design variations of Invelox: Base, Cover Rounded Lip, Double Intake, and a combination of both. Data were collected through simulations involving parameters such as velocity, pressure, contours, and streamlines. The analysis technique involved comparing the average and maximum values of velocity and pressure for each design. The results indicate that the combined modification enhances airflow velocity by increasing the captured air volume and directing the flow more smoothly. However, the curved shape of the Cover Rounded Lip tends to spread the flow direction, preventing full concentration of airflow energy. The study concludes that the Double Intake is more effective in increasing airflow velocity, while the Cover Rounded Lip contributes to flow direction control but has limitations in flow concentration. Further research is recommended to explore the geometry of the Elbow and Cover in more detail, in order to minimize energy losses and optimize airflow direction within the Invelox system..

Keywords: wind energy, invelox CFD simulation, Double Intake, Cover Rounded Lip, flow efficiency

PENDAHULUAN

Menurut analisis dari International Renewable Energy Agency (IRENA), potensi energi terbarukan di Indonesia diperkirakan dapat mencapai 3.692 gigawatt (GW), termasuk potensi dari tenaga surya, angin, air, biomassa, panas bumi, arus laut, dan lain sebagainya. Meskipun potensi Energi baru dan terbarukan (EBT) di Indonesia sangat besar, kapasitas energi terbarukan yang dimanfaatkan di Indonesia masih sangat minim, yaitu sekitar 10,5 GW saja dari potensi yang ada. Secara lebih spesifik, Indonesia memiliki potensi energi surya sekitar 2.898 GW, energi angin dari lepas pantai sekitar 589 GW, serta potensi energi air atau hydropower yang mencapai 94,6 GW (Anonymous, 2024).

Sementara pemanfaatan energi angin hanya dimanfaatkan sebesar 0,2 GW, yang sangatlah kecil dibandingkan data potensi energi. Angin adalah gerakan udara dari daerah yang bertekanan tinggi ke daerah yang bertekanan rendah (Anwar, 2008). Angin merupakan sumber energi terbarukan, sehingga dapat digolongkan ke dalam sumber energi yang berkelanjutan (Wihatma & Yushardi, 2022).

Pembangkit listrik tenaga angin/bayu atau (PLTB) merupakan fasilitas atau instalasi yang menggunakan energi angin untuk menghasilkan listrik (Rangkuti, 2023). Pembangkit listrik tenaga angin memiliki beberapa macam turbin seperti Turbin Angin Berporos Horizontal, Turbin Angin Berporos Vertikal, Turbin Angin Darat, Turbin Angin Laut, Turbin Angin Terapung, Turbin Angin Mikro

(Brilliyan, 2023), dan Ducted Wind Turbine (Aravindhan et al., 2023). Turbin angin ini memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing.

Ducted Wind Turbine adalah bentuk baru konverter energi angin yang diciptakan sebagai bagian dari beberapa teknologi untuk menghasilkan listrik dari sumber daya terbarukan (DWT). Ducted Wind Turbine memiliki dua macam yaitu Ducted Wind Turbines dan Invelox (Taghinezhad et al., 2019). Invelox adalah sebuah Ducted Wind Turbine (DWT) inovatif yang ditemukan oleh Daryoush Allaei (Alkhalidi et al., 2022). Invelox adalah sistem penangkapan dan pengiriman angin yang memungkinkan kontrol teknis lebih besar dibandingkan sebelumnya (Allaei & Andreopoulos, 2014). Salah satu kelebihan Invelox adalah dapat menangkap angin dari segala arah tanpa adanya mekanisme yaw (Ding, 2020). Manfaat Invelox adalah dapat menghasilkan listrik dengan menggunakan sumber daya alam terbarukan yang artinya tak terbatas. INVELOX dapat dirancang untuk menangkap dan mempercepat udara menggunakan omnidirectional Intake (Allaei & Andreopoulos, 2014).

Berbagai penelitian telah mengevaluasi kinerja Invelox melalui simulasi ANSYS dan uji eksperimental. Akour & Bataineh (2019) memperkenalkan Cover Rounded Lip, yang meningkatkan kecepatan angin hingga 4,6 kali lipat. Sotoudeh et al. (2019) menunjukkan bahwa konfigurasi Double Intake efektif meningkatkan kinerja dengan SR 1,90. Hosseini & Ganji (2020) menambahkan bahwa optimalisasi nosel dan diffuser dapat meningkatkan efisiensi saluran selama pemisahan aliran dihindari.

Lalu Penelitian yang dilakukan Aravindhan et al pada tahun 2023 menyimpulkan penggunaan perangkat nosel dan diffuser untuk mempercepat, memperlambat, atau mempengaruhi aliran dengan cara yang diinginkan telah diketahui secara luas. Studi ini berfokus pada kinerja aliran udara turbin dan turbulensi pada sistem Invelox. Modifikasi area corong dan Venturi diketahui dapat meningkatkan kecepatan aliran udara di area Venturi. Desain Double Intake Invelox efektif untuk mencapai laju aliran yang lebih tinggi dibandingkan desain konvensional, dengan laju aliran maksimum 1,90. Cover Rounded Lip meningkatkan kecepatan aliran udara di area Venturi sebesar 4,6 kali lipat. Selain itu, perubahan yang dilakukan pada area nosel dan diffuser juga berkontribusi pada penyempurnaan desain area Venturi.

Sebagai kesimpulan penelitian turbin angin Invelox di atas, peneliti hendak meneliti Sistem Invelox dengan modifikasi Double Intake dan Cover Rounded Lip untuk meningkatkan kinerja dari Invelox. Riset ini diharapkan dapat menciptakan artikel yang bermanfaat untuk pembaca sekalian.

METODE

Metode dalam penelitian ini menggunakan metode eksperimen, pada percobaan ini peneliti melakukan pemeriksaan dengan cara simulasi dengan menggunakan software Ansys untuk melakukan percobaan terhadap modifikasi-modifikasi yang ditentukan pada INVELOX. Penelitian ini dilakukan dalam kondisi dan peralatan yang telah disesuaikan.

TEMPAT DAN WAKTU PENELITIAN

• Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Universitas Negeri Surabaya.

• Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Februari hingga Maret 2025.

VARIABEL PENELITIAN

• Variabel Bebas (*Independent*)

Penelitian ini menggunakan variabel bebas yaitu desain modifikasi Invelox: Double Intake dengan Cover Rounded, Double Intake, Cover Rounded Lip, dan Base.

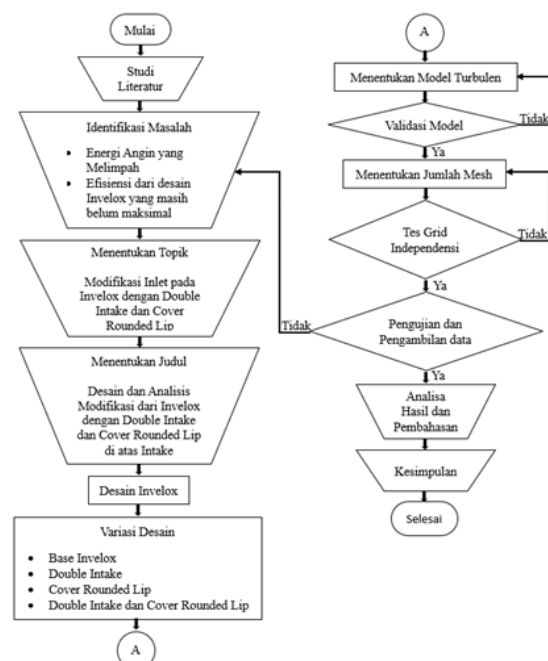
• Variabel Terikat (*Dependent*)

Penelitian ini menggunakan variabel terikat yaitu kecepatan angin dan tekanan pada Outlet dari Venturi, kontur kecepatan, kontur tekanan, dan garis alir (stream line).

• Variabel Kontrol

Penelitian ini menggunakan variabel kontrol yaitu kecepatan angin yang masuk melalui Inlet.

RANCANGAN PENELITIAN



Gambar 1. Flowchart Penelitian

PROSEDUR PENELITIAN

A. Pembuatan Model

- Mempersiapkan mesin computer..
- Mempersiapkan *software Solidworks dan Ansys FLUENT*.
- Buat model geometri *Invelox* dengan modifikasi yang telah ditentukan dengan bantuan *software Solidworks*

B. Proses Validasi Model/Solver

DESAIN DAN ANALISIS MODIFIKASI DARI INVELOX DENGAN DOUBLE INTAKE DAN COVER ROUNDED LIP DI ATAS INTAKE

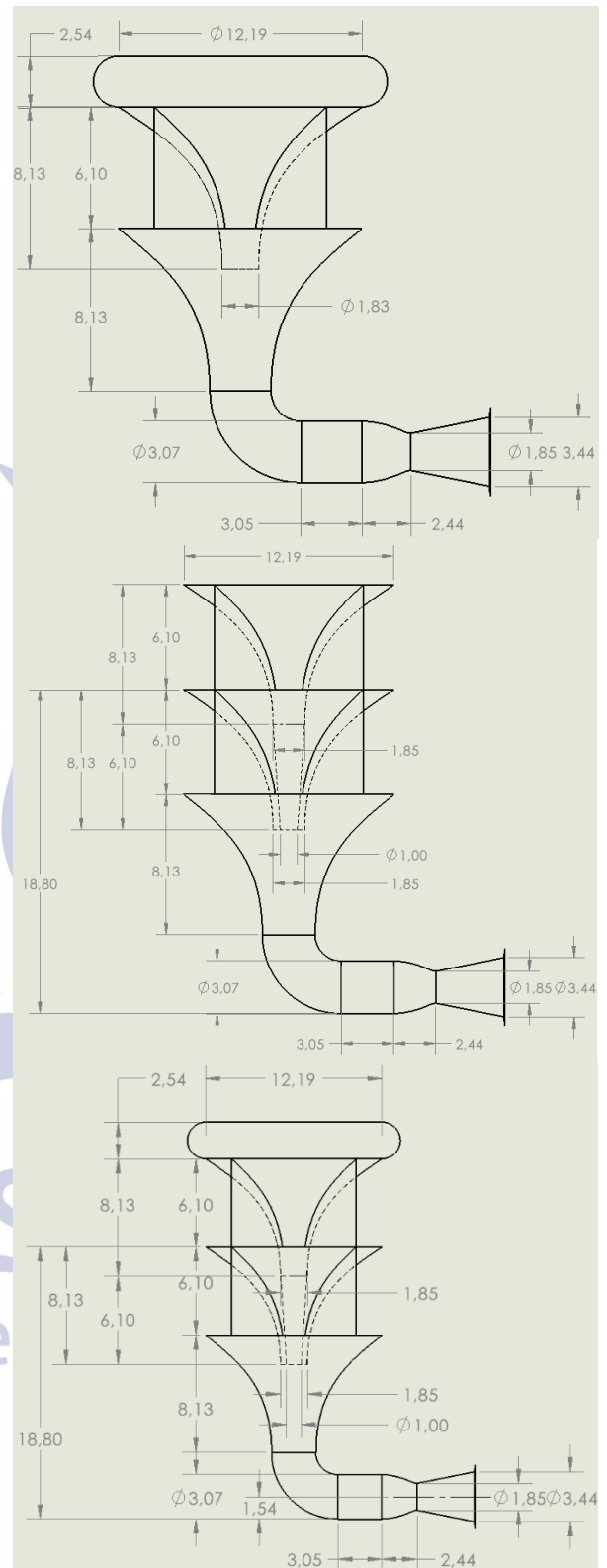
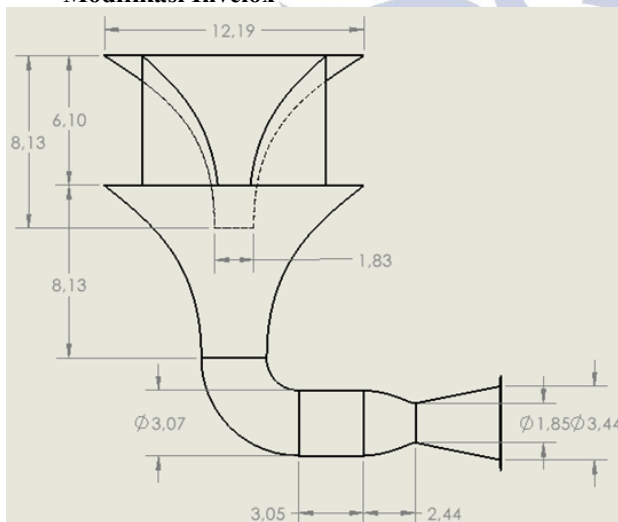
- Buka ANSYS Fluent lalu Aktifkan Double Precision dan pilih Steady pada tab General..
- Pilih Model Turbulensi dan gunakan k-epsilon Standard atau Realizable dengan Standard Wall Functions, mengacu pada Allaei & Andreopoulos (2014).
- Set Fluida dengan Udara ($\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$; $\mu = 1,562 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$).
- Boundary conditions ditetapkan dengan Velocity Inlet pada Reynolds Number 413.844– $1,24 \times 10^6$, turbulensi 5%, dan length scale 1 m. Pressure Outlet diarahkan normal ke boundary dengan turbulensi 5%, dan wall menggunakan kondisi No Slip.
- Atur Tekanan referensi Compute from Inlet dengan tekanan 101.325 Pa.
- Pada Solution Method menggunakan Coupled Scheme; Second Order (Pressure); Second Order Upwind (Momentum, k, ϵ).

C. Test Grid Independensi

- Lakukan simulasi dengan variasi mesh (jumlah node dan elemen berbeda).
- Catat AVG dan Max Velocity Venturi serta hitung error terhadap referensi.
- Evaluasi hasil, pilih mesh dengan perubahan hasil kecil dan grid paling sedikit.
- Ditetapkan mesh optimal
- Lanjutkan simulasi utama menggunakan mesh yang telah ditentukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Bentuk Detail Dimensi dan Geometri dari Modifikasi Invelox



Gambar 2. a) Base Invelox b) Invelox dengan Cover Rounded Lip c) Invelox dengan Double Intake d) Invelox dengan Cover Rounded Lip dan Double Intake.

B. Hasil Simulasi

- **Kecepatan Aliran Variasi *Invelox* pada Venturi**

Tabel 1. Kecepatan pada *Venturi Invelox*

<i>Velocity Inlet</i>	Variasi Model	<i>AVG Velocity Venturi [m/s]</i>	<i>Max Velocity Venturi [m/s]</i>
1,718 [m/s]	<i>Base</i>	2,375	3,252
	<i>Cover Rounded Lip</i>	2,309	3,214
	<i>Double Intake</i>	2,408	3,386
	<i>Double Intake dan Cover Rounded Lip</i>	2,365	3,304
3,436 [m/s]	<i>Base</i>	4,791	6,514
	<i>Cover Rounded Lip</i>	4,656	6,494
	<i>Double Intake</i>	4,855	6,819
	<i>Double Intake dan Cover Rounded Lip</i>	4,803	6,693
5,154 [m/s]	<i>Base</i>	7,223	9,823
	<i>Cover Rounded Lip</i>	7,017	9,794
	<i>Double Intake</i>	7,340	10,350
	<i>Double Intake dan Cover Rounded Lip</i>	7,210	10,046

- **Tekanan pada Variasi *Invelox***

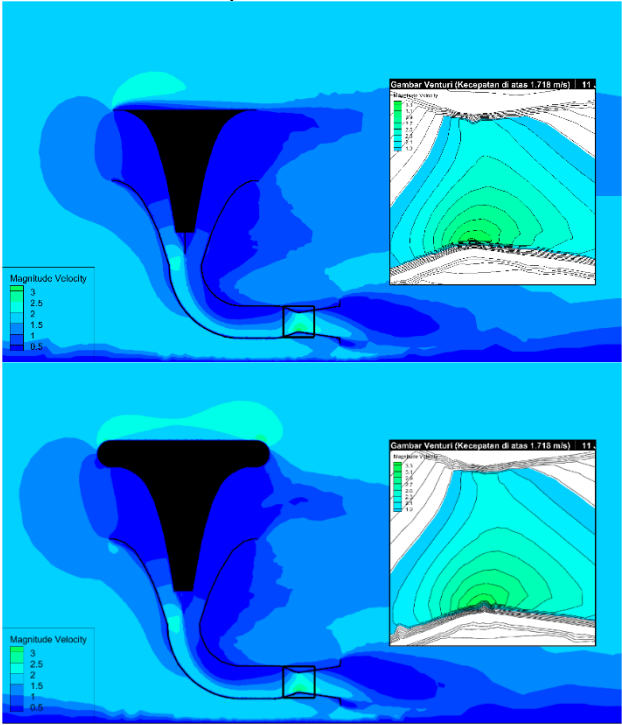
Tabel 2 Tekanan pada *Venturi Invelox*

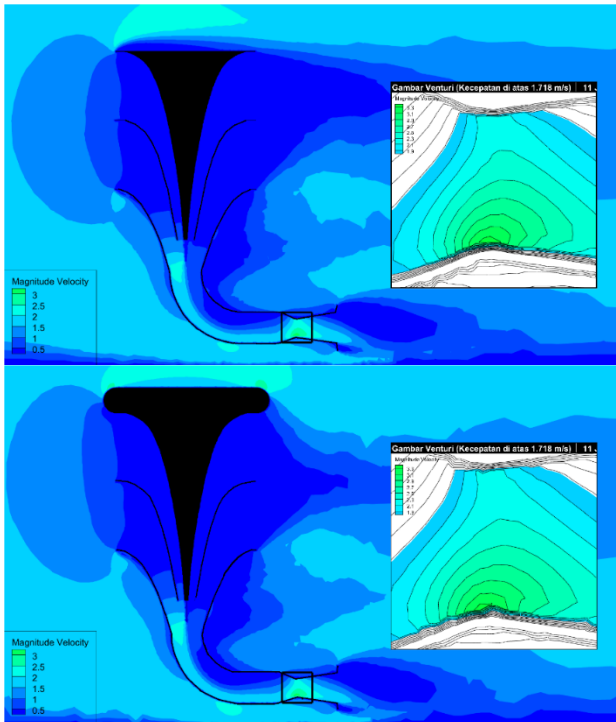
<i>Velocity Inlet</i>	Variasi Model	<i>AVG Pressure [Pa]</i>		
		<i>Inlet</i>	<i>Venturi</i>	<i>Outlet</i>
1,718 [m/s]	<i>Base</i>	101.326,4	101.321,1	101.323,9
	<i>Cover Rounded Lip</i>	101.326,5	101.321,3	101.323,9
	<i>Double Intake</i>	101.326,4	101.320,9	101.323,8
	<i>Double Intake dan Cover Rounded Lip</i>	101.326,5	101.321,1	101.323,7

3,436 [m/s]	<i>Base</i>	101.330,5	101.309,2	101.320,6
	<i>Cover Rounded Lip</i>	101.331,1	101.310,0	101.320,6
	<i>Double Intake</i>	101.330,6	101.308,5	101.320,0
	<i>Double Intake dan Cover Rounded Lip</i>	101.331,1	101.308,8	101.319,9
5,154 [m/s]	<i>Base</i>	101.337,3	101.289,0	101.315,0
	<i>Cover Rounded Lip</i>	101.338,6	101.291,0	101.315,1
	<i>Double Intake</i>	101.337,6	101.287,2	101.313,7
	<i>Double Intake dan Cover Rounded Lip</i>	101.338,8	101.288,5	101.313,6

- **Hasil Kontur Kecepatan dari Variasi *Invelox***

1. Pada Kecepatan *Inlet* 1,718 m/s





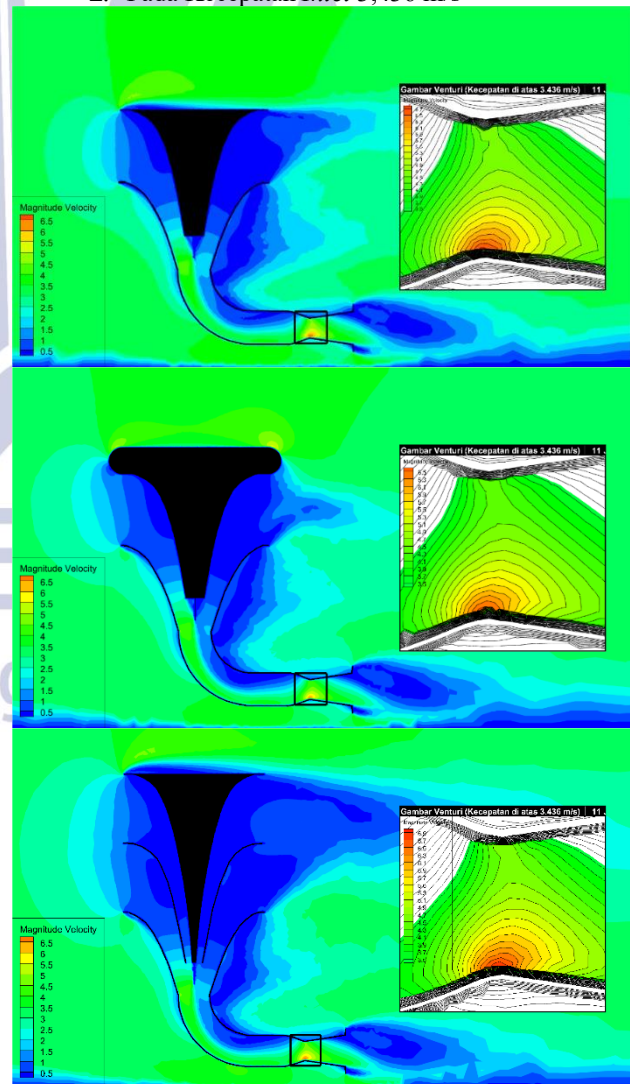
Gambar 3. Kontur Kecepatan pada Inlet 1.718 m/s: (a) *Invelox Base*, (b) *Invelox Cover Rounded Lip*, (c) *Invelox Double Intake*, dan (d) *Invelox Double Intake dan Cover Rounded Lip*

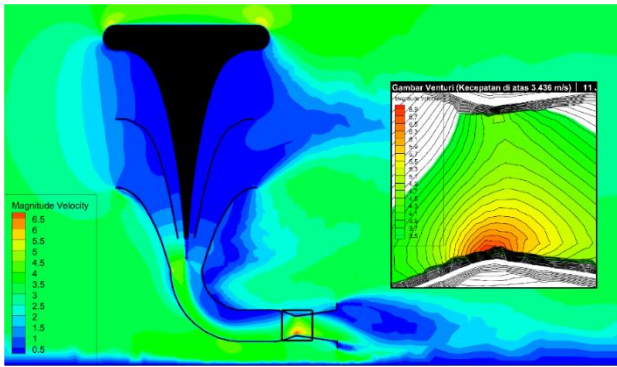
Saat udara memasuki sistem melalui inlet, semua konfigurasi menunjukkan pola aliran dari lingkungan bebas ke saluran tertutup. Berdasarkan hukum Bernoulli, pada penampang yang lebih besar, tekanan udara lebih tinggi dan kecepatan lebih rendah, dengan kisaran kecepatan awal sekitar 1–1,5 m/s yang tergambarkan dalam warna biru muda. Kesamaan di semua konfigurasi adalah adanya zona perlambatan sebelum aliran diarahkan ke bawah. Namun, terdapat perbedaan karakteristik aliran: *Invelox Base* menunjukkan aliran yang menyebar sebelum turun, *Cover Rounded Lip* mengarahkan aliran lebih halus ke bawah berkat bentuk cover-nya, *Double Intake* memperlihatkan distribusi aliran yang lebih lebar karena dua jalur masuk, sedangkan kombinasi *Double Intake* dan *Cover Rounded Lip* menghasilkan aliran yang lebih besar dan terarah.

Pada bagian Elbow, aliran berubah arah dari vertikal ke horizontal, menciptakan gaya sentrifugal yang mempercepat aliran di sisi luar hingga 2–2,5 m/s dan menyebabkan perlambatan serta recirculation di sisi dalam. Semua konfigurasi menunjukkan zona biru muda di awal Elbow, menandakan adanya gangguan dan pembentukan vorteks kecil. Aliran pada konfigurasi *Cover Rounded Lip* serta *Double Intake* dan *Cover Rounded Lip* terlihat lebih halus di dalam Elbow, sehingga separasi aliran berkurang.

Setelah melewati Elbow, udara memasuki saluran Venturi yang terdiri dari bagian konvergen, Throat, dan divergen. Di zona konvergen, kecepatan meningkat dan tekanan menurun sesuai hukum Bernoulli, dengan kecepatan maksimum 2,7–3,3 m/s tercapai di Throat, ditandai oleh warna biru muda hingga hijau. Semua konfigurasi menunjukkan pola percepatan serupa, namun perbedaannya terlihat pada luasnya zona kecepatan tinggi: konfigurasi *Double Intake* dan *Double Intake dengan Cover Rounded Lip* menunjukkan area berkecepatan tinggi yang lebih besar akibat debit udara yang lebih besar. Selain itu, aliran di dinding Throat pada konfigurasi *Cover Rounded Lip* dan *Double Intake dengan Cover Rounded Lip* tampak lebih turbulen karena adanya arah masuk aliran dari bagian atas, sedangkan pada *Invelox Base* dan *Double Intake*, aliran tampak lebih stabil dan terfokus sepanjang saluran Venturi.

2. Pada Kecepatan *Inlet* 3,436 m/s





Gambar 4. Kontur Kecepatan pada *Inlet* 3.436 m/s: (a) *Invelox Base*, (b) *Invelox Cover Rounded Lip*, (c) *Invelox Double Intake*, dan (d) *Invelox Double Intake dan Cover Rounded Lip*

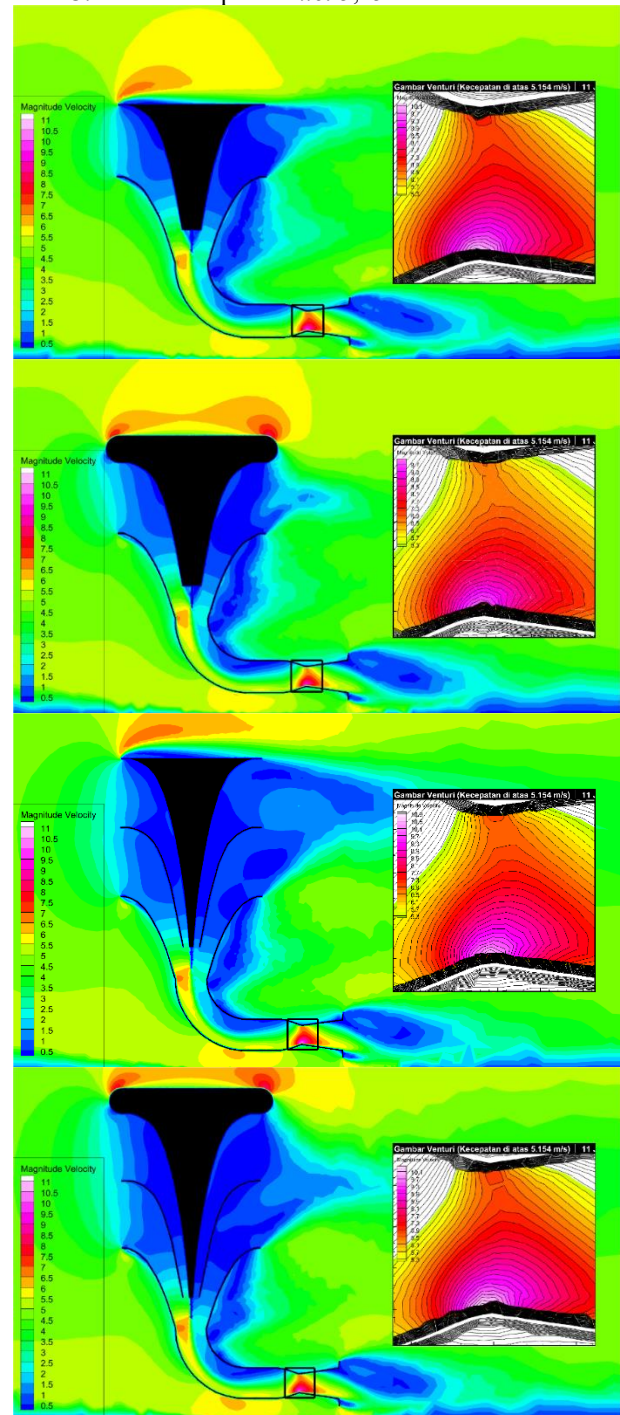
Ketika udara memasuki sistem melalui inlet, semua konfigurasi menunjukkan pola aliran dari lingkungan bebas menuju saluran tertutup. Berdasarkan hukum Bernoulli, udara yang melewati penampang besar memiliki tekanan lebih tinggi dan kecepatan lebih rendah, dengan kecepatan awal berkisar 1–2,5 m/s yang tergambarkan dalam warna biru hingga biru muda. Semua konfigurasi memperlihatkan adanya zona perlambatan sebelum aliran diarahkan ke bawah, namun dengan karakteristik berbeda. *Invelox Base* memperlihatkan aliran yang cenderung menyebar sebelum turun, sedangkan *Cover Rounded Lip* mengarahkan aliran lebih halus ke bawah berkat bentuk atasnya yang membulat. *Double Intake* menunjukkan dua jalur masuk dari samping dengan distribusi kecepatan yang lebih luas, sementara kombinasi *Double Intake* dan *Cover Rounded Lip* menghasilkan aliran yang lebih besar dan terarah.

Pada bagian *Elbow*, aliran berbelok dari vertikal ke horizontal, menciptakan gaya sentrifugal yang mempercepat aliran di sisi luar hingga 3–4,5 m/s, sementara sisi dalam mengalami perlambatan hingga membentuk zona *recirculation*. Semua konfigurasi menunjukkan zona hijau kekuningan di awal *Elbow*, menandakan adanya gangguan aliran dan pembentukan vorteks kecil. Aliran dalam *Elbow* tampak lebih halus pada konfigurasi *Cover Rounded Lip* dan *Double Intake* dengan *Cover Rounded Lip*, yang membantu mengurangi separasi dan menjaga kestabilan kecepatan.

Setelah *Elbow*, udara memasuki *Venturi* yang terdiri dari zona konvergen, *Throat*, dan divergen. Di konvergen, penurunan luas penampang mempercepat aliran dan menurunkan tekanan, dengan kecepatan maksimum 5,5–6,9 m/s tercapai di *Throat*, ditandai dengan warna jingga hingga merah. Semua konfigurasi mencapai kecepatan puncak di *Throat*, lalu melambat di divergen seiring pemulihan tekanan. Namun, konfigurasi *Double Intake* dan *Double Intake* dengan *Cover*

Rounded Lip memperlihatkan area kecepatan tinggi yang lebih luas di *Throat* karena debit udara yang lebih besar. Selain itu, pada *Cover Rounded Lip* dan *Double Intake* dengan *Cover Rounded Lip*, aliran di dinding *Throat* tampak lebih turbulen akibat arah masuk aliran dari atas yang menyebabkan gradien kecepatan tidak merata, sedangkan *Invelox Base* dan *Double Intake* menunjukkan pola aliran yang lebih stabil dan terkonsentrasi sepanjang *Venturi*.

3. Pada Kecepatan *Inlet* 5,154 m/s



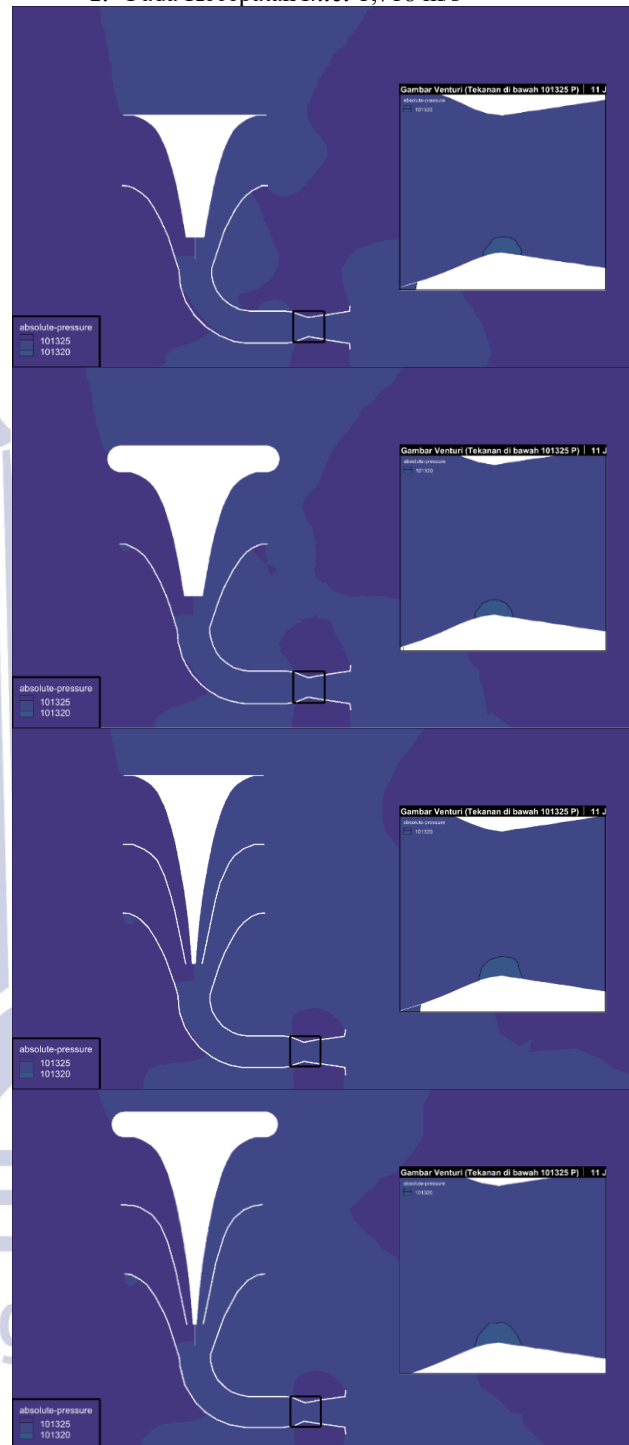
Gambar 5. Kontur Kecepatan pada *Inlet* 5,153 m/s: (a) *Invelox Base*, (b) *Invelox Cover Rounded Lip*, (c) *Invelox Double Intake*, dan (d) *Invelox Double Intake dan Cover Rounded Lip*

Ketika udara pertama kali memasuki sistem melalui inlet, seluruh konfigurasi menunjukkan aliran dari lingkungan bebas menuju saluran tertutup. Berdasarkan hukum Bernoulli, udara pada penampang besar memiliki tekanan lebih tinggi dan kecepatan lebih rendah, dengan kecepatan awal sekitar 1–3,5 m/s yang tergambarkan dalam warna biru hingga hijau muda. Semua konfigurasi memperlihatkan adanya zona perlambatan di depan inlet sebelum aliran diarahkan ke bawah. Namun, arah aliran berbeda pada tiap variasi: Invelox Base menunjukkan aliran yang menyebar sebelum turun, Cover Rounded Lip menghasilkan aliran lebih terarah ke bawah berkat bentuk atas yang membulat, Double Intake menunjukkan dua jalur aliran samping dengan distribusi kecepatan lebih luas, sedangkan kombinasi Double Intake dan Cover Rounded Lip menghasilkan aliran yang lebih besar dan lebih terarah.

Pada bagian Elbow, udara berbelok dari vertikal ke horizontal, menghasilkan gaya sentrifugal yang mempercepat aliran di sisi luar hingga 4,5–6 m/s, sementara sisi dalam mengalami perlambatan dan membentuk zona recirculation. Semua konfigurasi menunjukkan zona jingga di awal Elbow, menandakan adanya gangguan awal aliran dan pembentukan vorteks kecil. Aliran dalam Elbow tampak lebih halus pada konfigurasi Cover Rounded Lip serta Double Intake dan Cover Rounded Lip, sehingga separasi aliran berkurang dan kecepatan lebih terjaga.

Setelah Elbow, udara memasuki saluran Venturi yang terdiri dari zona konvergen, Throat, dan divergen. Di zona konvergen, luas penampang yang menyempit mempercepat aliran hingga mencapai kecepatan maksimum 8,9–9,5 m/s di Throat, ditunjukkan oleh warna pink hingga putih. Setelah melewati Throat, kecepatan menurun kembali di bagian divergen seiring pemulihan tekanan. Pada konfigurasi Double Intake dan Double Intake dengan Cover Rounded Lip, area berwarna pink di Throat terlihat lebih luas, menandakan volume aliran berkecepatan tinggi yang lebih besar akibat debit udara yang lebih tinggi. Selain itu, aliran di sekitar dinding Throat tampak lebih turbulen pada konfigurasi Cover Rounded Lip serta Double Intake dengan Cover Rounded Lip karena arah masuk aliran dari bagian atas yang menyebabkan gradien kecepatan tidak merata. Sebaliknya, Invelox Base dan Double Intake menunjukkan pola aliran yang lebih stabil dan terkonsentrasi di sepanjang Venturi, dengan zona kecepatan tinggi yang padat namun lebih terkendali.

• Hasil Kontur Tekanan dari Variasi *Invelox* 1. Pada Kecepatan *Inlet* 1,718 m/s

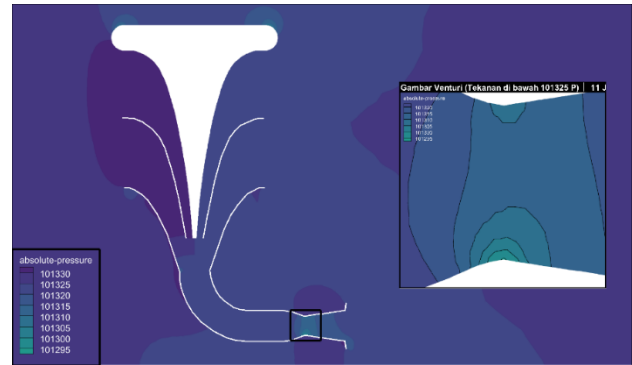
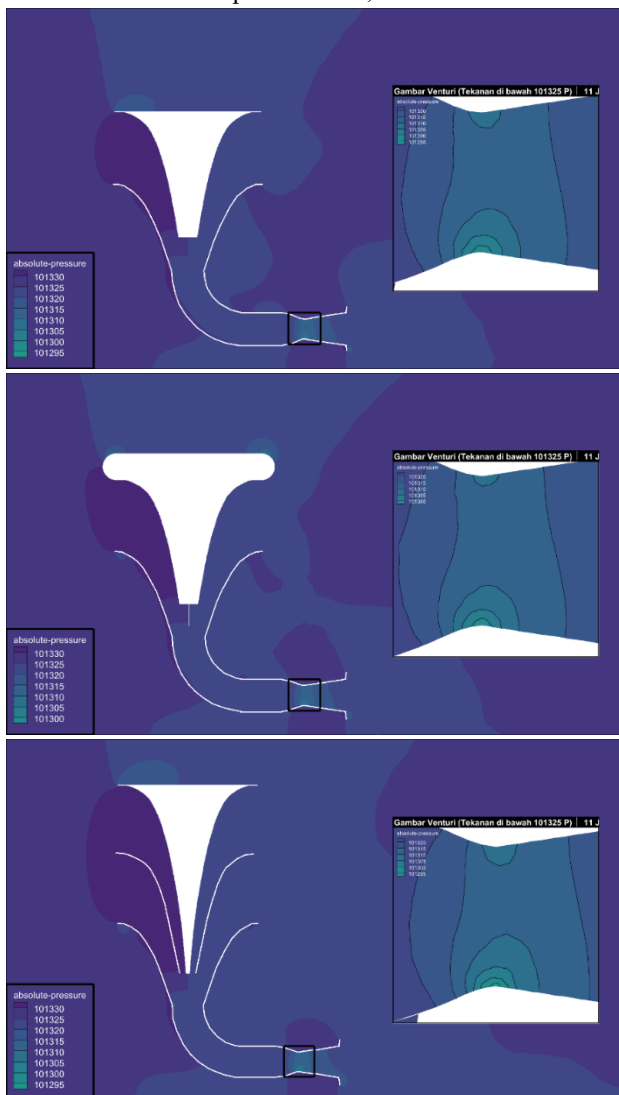


Gambar 6. Kontur Tekanan pada Inlet 1,718 m/s: (a) *Invelox Base*, (b) *Invelox Cover Rounded Lip*, (c) *Invelox Double Intake*, dan (d) *Invelox Double Intake dan Cover Rounded Lip*

Keempat desain *Invelox* menunjukkan distribusi tekanan yang relatif seragam dan terpusat di area tengah inlet, dengan tekanan sekitar 101.325 Pa. Tekanan tinggi ini menandakan bahwa aliran udara masuk secara dominan dari satu arah, menghasilkan pola tekanan yang stabil di sekitar pusat saluran masuk. Saat udara memasuki Elbow, seluruh desain menunjukkan penurunan tekanan akibat

perubahan arah aliran dari vertikal ke horizontal. Invelox Base dan Cover Rounded Lip memiliki pola tekanan yang mirip, namun Cover Rounded Lip menunjukkan gradien tekanan yang lebih halus, menandakan berkurangnya turbulensi karena bentuk cover yang membulat. Sementara itu, Invelox Double Intake dan kombinasi Rounded Top dengan Double Intake menunjukkan pola percampuran tekanan serupa dengan Cover Rounded Lip. Di segmen Venturi, semua konfigurasi menunjukkan tekanan terendah, sesuai dengan prinsip Bernoulli di mana percepatan aliran akibat penyempitan menyebabkan penurunan tekanan hingga sekitar 101.320 Pa, menunjukkan percepatan aliran yang stabil.

2. Pada Kecepatan *Inlet* 3,436 m/s



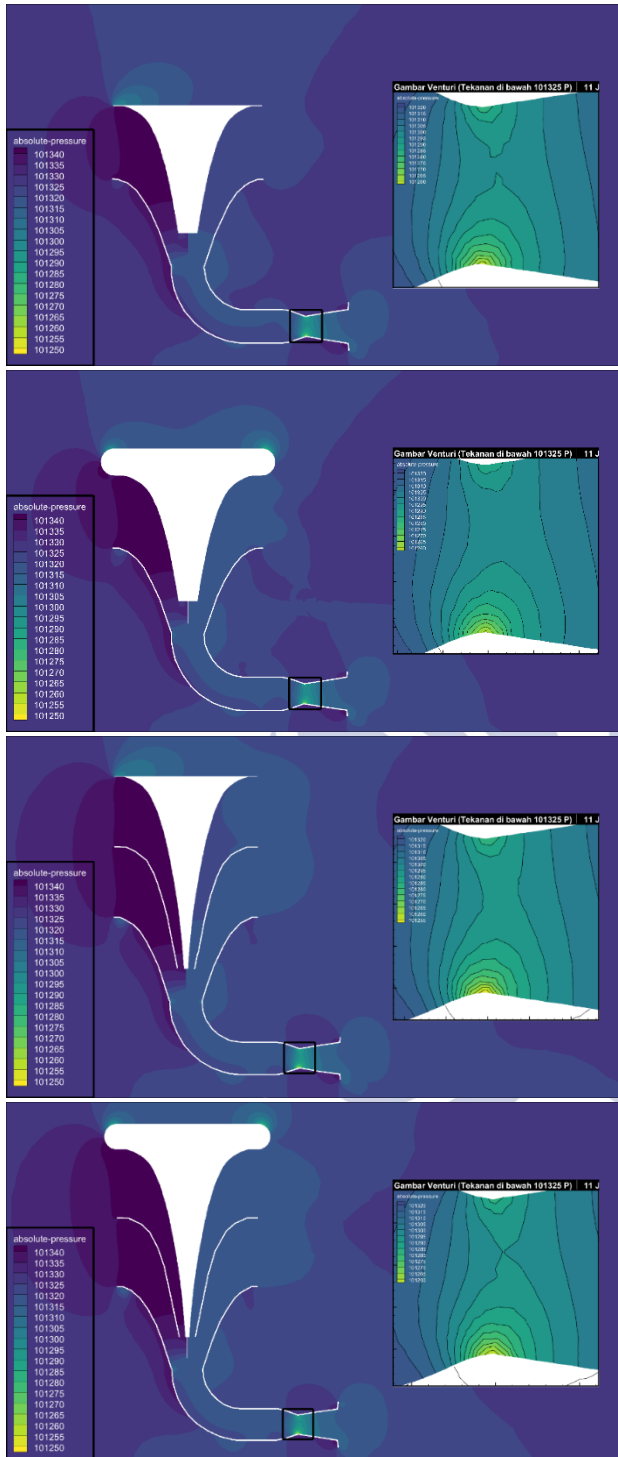
Gambar 7. Kontur Tekanan pada *Inlet* 3,436 m/s: (a) *Invelox Base*, (b) *Invelox Cover Rounded Lip*, (c) *Invelox Double Intake*, dan (d) *Invelox Double Intake dan Cover Rounded Lip*

Keempat desain Invelox menunjukkan pola tekanan tinggi di area inlet, namun dengan perbedaan pada sebaran dan distribusinya. Invelox Base memperlihatkan tekanan sekitar 101.330 Pa yang terpusat secara stabil di tengah inlet, menandakan aliran udara masuk dari satu arah dominan. Pada desain Cover Rounded Lip, tekanan tampak lebih tersebar ke arah atas karena bentuk penutup yang membulat, memungkinkan penangkapan angin dari arah yang lebih luas. Desain Double Intake menunjukkan dua jalur masuk dengan distribusi tekanan tinggi yang lebih merata ke arah bawah. Kombinasi Double Intake dan Cover Rounded Lip menghasilkan sebaran tekanan yang lebih luas, mencerminkan gabungan efek penangkapan dari kedua komponen tersebut.

Pada bagian Elbow, semua desain menunjukkan penurunan tekanan akibat perubahan arah aliran dari vertikal ke horizontal. Invelox Base dan Cover Rounded Lip memiliki distribusi tekanan yang mirip, namun Cover Rounded Lip menunjukkan gradien tekanan lebih halus, menandakan pengurangan turbulensi. Double Intake dan kombinasi Double Intake dengan Cover Rounded Lip memperlihatkan pola percampuran tekanan yang menyerupai Cover Rounded Lip.

Di segmen Venturi, seluruh konfigurasi menunjukkan tekanan paling rendah sesuai prinsip Bernoulli, akibat peningkatan kecepatan di area penyempitan. Invelox Base dan Double Intake menampilkan penurunan tekanan hingga sekitar 101.295 Pa, sedangkan Cover Rounded Lip menunjukkan penurunan yang lebih stabil sekitar 101.300 Pa, menunjukkan percepatan aliran yang konsisten di seluruh konfigurasi.

3. Pada Kecepatan *Inlet* 5,154 m/s



Gambar 8. Kontur Tekanan pada *Inlet* 5,154 m/s: (a) *Invelox Base*, (b) *Invelox Cover Rounded Lip*, (c) *Invelox Double Intake*, dan (d) *Invelox Double Intake dan Cover Rounded Lip*

Keempat desain *Invelox* menunjukkan pola tekanan tinggi di area inlet, namun dengan perbedaan pada penyebaran dan distribusinya. *Invelox Base* memiliki tekanan sekitar 101.340 Pa yang terpusat stabil di tengah inlet, menandakan aliran udara dominan dari satu arah. Pada *Cover Rounded Lip*, tekanan lebih tersebar ke arah atas karena bentuk penutup membulat yang memungkinkan penangkapan

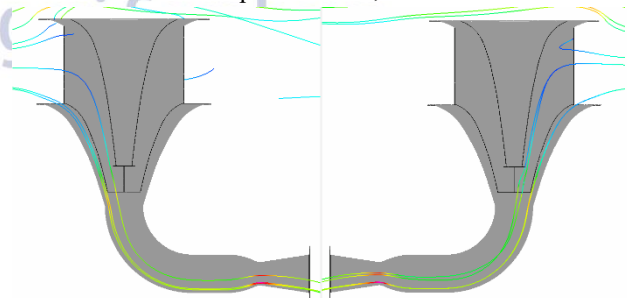
angin dari arah yang lebih luas. Desain *Double Intake* menampilkan dua jalur masuk dengan sebaran tekanan tinggi yang lebih merata ke arah bawah, sedangkan kombinasi *Double Intake dan Cover Rounded Lip* menghasilkan penyebaran tekanan yang lebih luas dan fleksibel, menangkap angin dari berbagai arah.

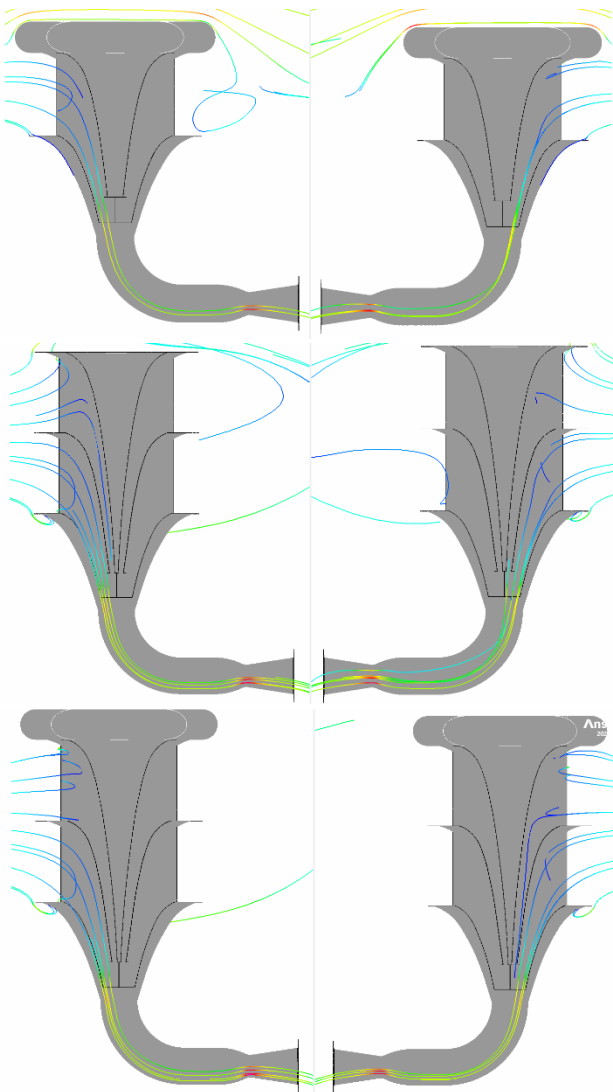
Pada bagian *Elbow*, seluruh desain menunjukkan penurunan tekanan akibat perubahan arah aliran dari vertikal ke horizontal. *Invelox Base dan Cover Rounded Lip* memiliki pola tekanan yang mirip, namun *Cover Rounded Lip* memperlihatkan gradien tekanan yang lebih halus karena pengurangan turbulensi oleh bentuk penutup yang membulat. *Double Intake* menunjukkan pencampuran aliran dari dua jalur masuk, menghasilkan distribusi tekanan yang lebih kompleks dengan zona tekanan menengah yang lebih luas. Kombinasi *Double Intake dan Cover Rounded Lip* memperlihatkan percampuran yang lebih tertata berkat bentuk *Rounded Top* yang membantu mengatur arah dan kekompakan aliran dengan lebih efisien.

Pada segmen *Venturi*, semua konfigurasi menunjukkan tekanan paling rendah sesuai prinsip Bernoulli, akibat peningkatan kecepatan saat melewati penyempitan. Tekanan minimum pada *Invelox Base dan Cover Rounded Lip* turun hingga sekitar 101.260 Pa, dengan *Cover Rounded Lip* menunjukkan area tekanan yang lebih terkonsentrasi. *Double Intake* menghasilkan tekanan terendah sekitar 101.255 Pa karena percepatan aliran yang lebih besar akibat konvergensi dari dua jalur masuk. Sementara itu, kombinasi *Double Intake dan Cover Rounded Lip* menghasilkan tekanan serupa dengan *Base dan Cover Rounded Lip*, yaitu sekitar 101.260 Pa, menunjukkan keseimbangan antara volume udara yang besar dan pengaturan aliran yang baik..

• Hasil *Streamline* dari Variasi *Invelox*

1. Pada Kecepatan *Inlet* 1,718 m/s





Gambar 9. Streamline pada Inlet 1,718 m/s: (a) *Invelox Base*, (b) *Invelox Cover Rounded Lip*, (c) *Invelox Double Intake*, dan (d) *Invelox Double Intake dan Cover Rounded Lip*

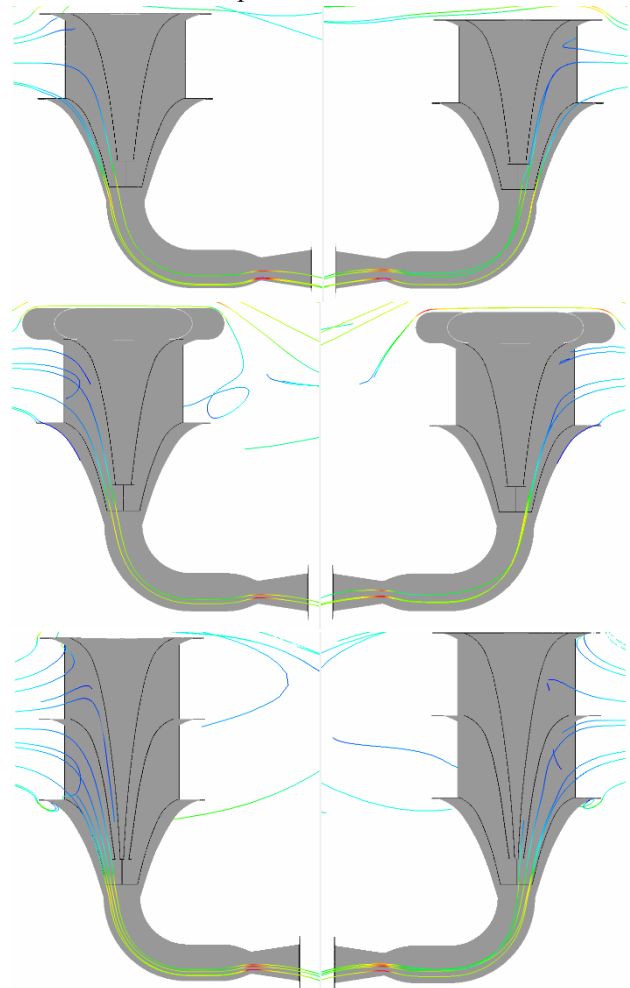
Ketika udara masuk melalui inlet, desain *Invelox Base* memperlihatkan sekitar 7 streamline yang masuk ke saluran, namun sebagian aliran udara dari luar menyebar ke samping dan tidak seluruhnya terkonsentrasi ke tengah. Pada *Cover Rounded Lip*, jumlah streamline lebih sedikit, sekitar 4–5, dengan arah aliran yang lebih sejajar namun volume udara yang masuk lebih kecil. Desain *Double Intake* menunjukkan dua jalur masuk dengan total sekitar 7 streamline, memperlihatkan aliran yang lebih banyak dibanding dua desain sebelumnya, meski sebagian masih menyebar ke luar. Kombinasi *Double Intake* dan *Cover Rounded Lip* menghasilkan jumlah streamline terbanyak, sekitar 8, dengan aliran kiri dan kanan yang stabil serta terpusat ke tengah inlet.

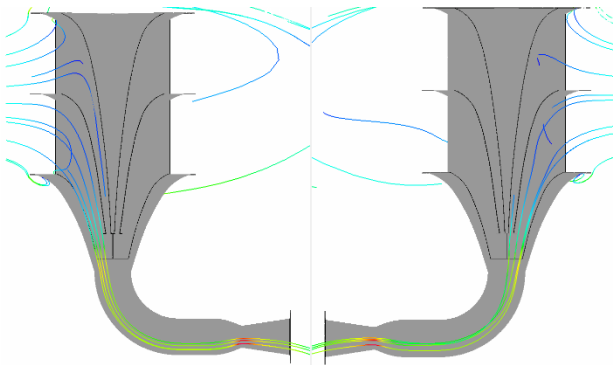
Di area *Elbow*, *Invelox Base* menunjukkan pola streamline yang melebar ke dinding bawah, menandakan perubahan arah yang cukup tajam. Pada *Cover Rounded Lip*, aliran yang semula sejajar mulai melebar setelah

Elbow, menunjukkan transisi aliran yang kurang terjaga. Sementara itu, *Double Intake* memperlihatkan aliran yang mulai menyatu dengan arah yang relatif sejajar, mengikuti kontur saluran dengan baik. Pola ini semakin halus pada kombinasi *Double Intake* dan *Cover Rounded Lip*, di mana aliran tampak paling stabil dan terarah tanpa penyebaran yang berarti. Kedua desain ini menunjukkan kestabilan dan kerapian aliran yang lebih baik dibanding dua desain lainnya.

Pada *Venturi*, *Invelox Base* menampilkan streamline yang melebar ke dinding atas dan bawah, menunjukkan distribusi aliran yang kurang terfokus ke tengah. *Cover Rounded Lip* memperlihatkan penyebaran yang semakin besar, dengan sebagian besar aliran mengikuti dinding dan hanya sedikit yang tetap di tengah. Sebaliknya, desain *Double Intake* menunjukkan aliran yang lebih stabil dan terpusat di tengah *Venturi*, dengan jumlah streamline lebih banyak dan arah yang sejajar. Pola ini hampir sama dengan kombinasi *Double Intake* dan *Cover Rounded Lip*, yang menunjukkan aliran paling lurus, terfokus, dan stabil hingga keluar dari *Venturi*.

2. Pada Kecepatan Inlet 3,436 m/s





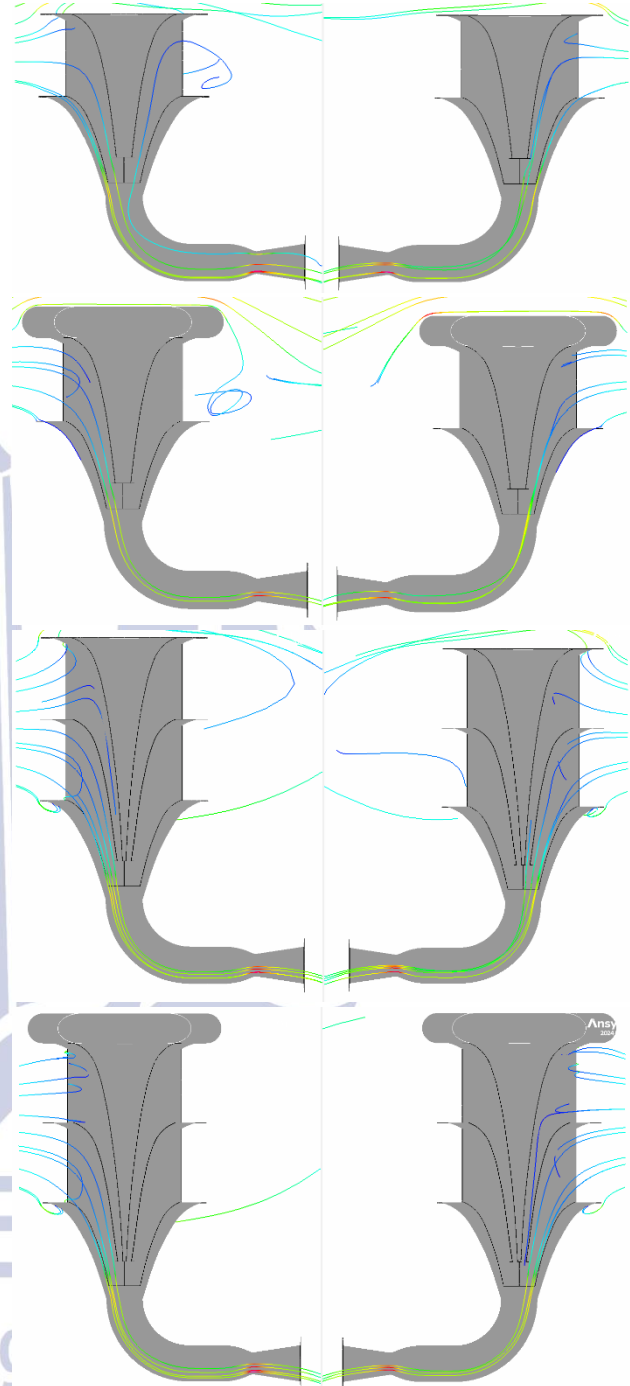
Gambar 10. Streamline pada Inlet 3,436 m/s: (a) *Invelox Base*, (b) *Invelox Cover Rounded Lip*, (c) *Invelox Double Intake*, dan (d) *Invelox Double Intake dan Cover Rounded Lip*

Saat udara masuk melalui inlet, desain *Invelox Base* memperlihatkan sekitar 7 streamline yang berhasil masuk, namun sebagian aliran udara menyebar ke samping dan hanya sebagian yang terkonsentrasi ke tengah. Pada *Cover Rounded Lip*, jumlah streamline lebih sedikit, sekitar 4–5, dengan arah yang lebih sejajar, namun volume udara yang masuk lebih kecil dibandingkan *Base*. Desain *Double Intake* menampilkan dua jalur masuk dengan total 7 streamline, memperlihatkan aliran yang lebih banyak dan lebih terdistribusi meskipun sebagian masih belum terfokus sepenuhnya ke tengah. Sementara itu, kombinasi *Double Intake* dan *Cover Rounded Lip* menunjukkan jumlah streamline terbanyak, sekitar 8, dengan aliran yang stabil dan terkonsentrasi di tengah inlet.

Di area *Elbow*, *Invelox Base* menunjukkan perubahan arah aliran yang tajam, sehingga streamline melebar ke dinding bawah. *Cover Rounded Lip* juga memperlihatkan pelebaran aliran setelah *Elbow*, meski arah masuk sebelumnya lebih sejajar. Sebaliknya, pada *Double Intake* dan kombinasi *Double Intake* dengan *Cover Rounded Lip*, aliran mulai menyatu dan mengikuti kontur saluran dengan rapi, menghasilkan transisi yang lebih halus dan stabil di *Elbow*. Kedua desain terakhir ini menunjukkan kestabilan dan kerapian aliran yang lebih baik dibanding dua desain sebelumnya.

Pada *Venturi*, *Invelox Base* menunjukkan pola streamline yang melebar ke dinding atas dan bawah, menandakan distribusi aliran yang kurang terfokus di tengah saluran. Pada *Cover Rounded Lip*, pelebaran aliran semakin terlihat, dengan sebagian besar streamline mengikuti dinding. Berbeda dengan itu, *Double Intake* dan kombinasinya dengan *Cover Rounded Lip* menunjukkan pola aliran yang lebih stabil, lurus, dan terfokus di tengah *Venturi*. Kedua desain terakhir ini memperlihatkan aliran paling stabil dan terarah hingga keluar dari *Venturi*, dengan penyebaran ke dinding yang sangat minim.

3. Pada Kecepatan Inlet 5,154 m/s



Gambar 11. Streamline pada Inlet 5,154 m/s: (a) *Invelox Base*, (b) *Invelox Cover Rounded Lip*, (c) *Invelox Double Intake*, dan (d) *Invelox Double Intake dan Cover Rounded Lip*

Saat udara masuk melalui inlet, desain *Invelox Base* memperlihatkan sekitar 7 streamline yang berhasil masuk ke saluran, namun sebagian aliran menyebar ke samping dan hanya sebagian terkonsentrasi ke tengah. Menariknya, salah satu streamline yang tidak masuk dari sisi kiri justru masuk melalui inlet kanan. Pada *Cover Rounded Lip*, jumlah streamline lebih sedikit, sekitar 4–5, dengan arah aliran yang lebih sejajar, tetapi volume udara yang masuk lebih kecil dibandingkan

Base. Desain Double Intake menunjukkan dua jalur masuk dengan total 7 streamline, memperlihatkan aliran yang lebih banyak, walaupun beberapa masih menyebar ke luar dan belum sepenuhnya fokus ke tengah. Kombinasi Double Intake dan Cover Rounded Lip menghasilkan jumlah streamline terbanyak, yaitu sekitar 8, dengan aliran kiri dan kanan yang stabil serta terpusat di tengah inlet.

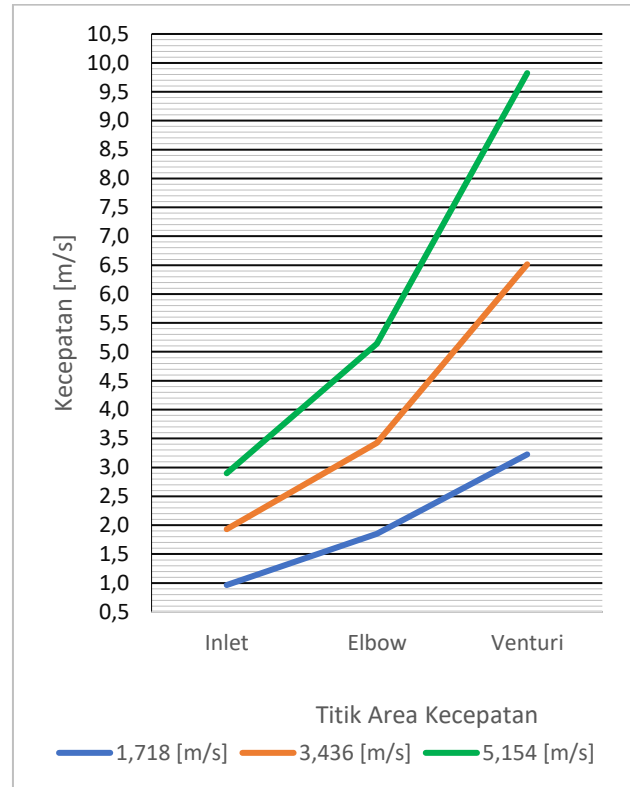
Pada bagian Elbow, Invelox Base menunjukkan perubahan arah aliran yang cukup tajam, sehingga streamline melebar ke dinding bawah, menandakan potensi penyebaran aliran. Pada Cover Rounded Lip, aliran yang sebelumnya sejajar mulai melebar setelah Elbow, menunjukkan transisi yang kurang terjaga. Sebaliknya, Double Intake memperlihatkan aliran yang mulai menyatu secara sejajar dan mengikuti kontur saluran dengan rapi, dengan penyebaran minimal. Pola ini hampir serupa dengan desain Double Intake dan Cover Rounded Lip, yang menunjukkan pertemuan aliran secara simetris dan stabil, menjadikan transisi di Elbow lebih halus dan bersih.

Di bagian Venturi, Invelox Base menampilkan streamline yang melebar ke dinding atas dan bawah, sehingga aliran kurang terfokus ke tengah meskipun terjadi percepatan. Pada Cover Rounded Lip, pelebaran aliran semakin besar, dengan sebagian besar streamline mengikuti dinding saluran. Sebaliknya, desain Double Intake memperlihatkan aliran yang lebih stabil dan terarah, dengan jumlah streamline lebih banyak dan sebagian besar sejajar serta terpusat di tengah saluran. Pola ini sangat mirip dengan desain Double Intake dan Cover Rounded Lip, yang menunjukkan aliran paling lurus dan padat. Kedua desain terakhir ini memperlihatkan kestabilan aliran dan arah streamline yang terjaga hingga keluar dari Venturi.

C. Analisa Pengaruh Kecepatan Angin pada Inlet terhadap Desain dan Modifikasi dari Invelox

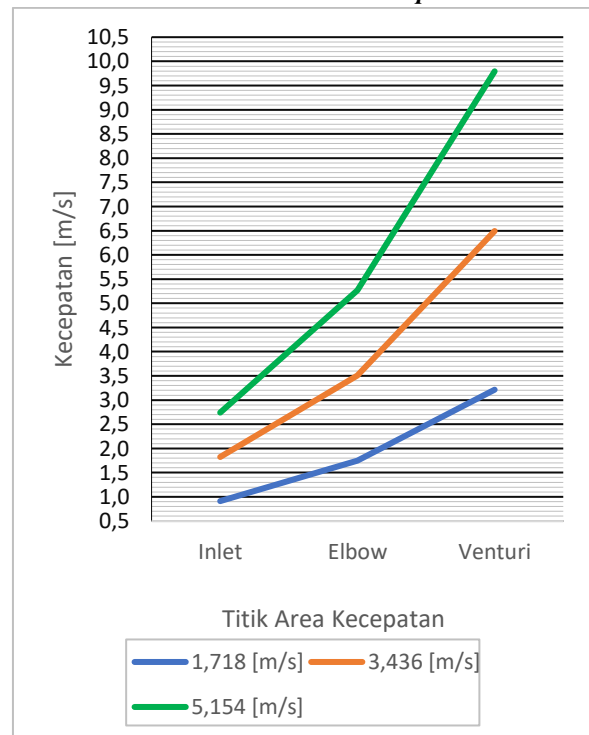
• Invelox Base

Pada kecepatan Inlet sebesar 1,718 m/s, aliran hanya mengalami sedikit peningkatan di Elbow dan mencapai sekitar 3,2 m/s di Venturi. Sementara itu, pada kecepatan Inlet 3,436 m/s, kecepatan meningkat lebih signifikan hingga 6,5 m/s di Venturi. Peningkatan paling drastis terjadi pada kecepatan Inlet 5,154 m/s, di mana kecepatan di Venturi mencapai hampir 10 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa geometri Invelox Base bekerja semakin efektif dalam mempercepat aliran saat kecepatan Inlet lebih tinggi,



Gambar 12. Grafik Kecepatan pada Modifikasi *Invelox Base* terutama di area Venturi yang dirancang untuk mempersempit jalur aliran dan mengonversi tekanan menjadi kecepatan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa performa Invelox Base cenderung meningkat secara signifikan pada kecepatan angin yang lebih tinggi.

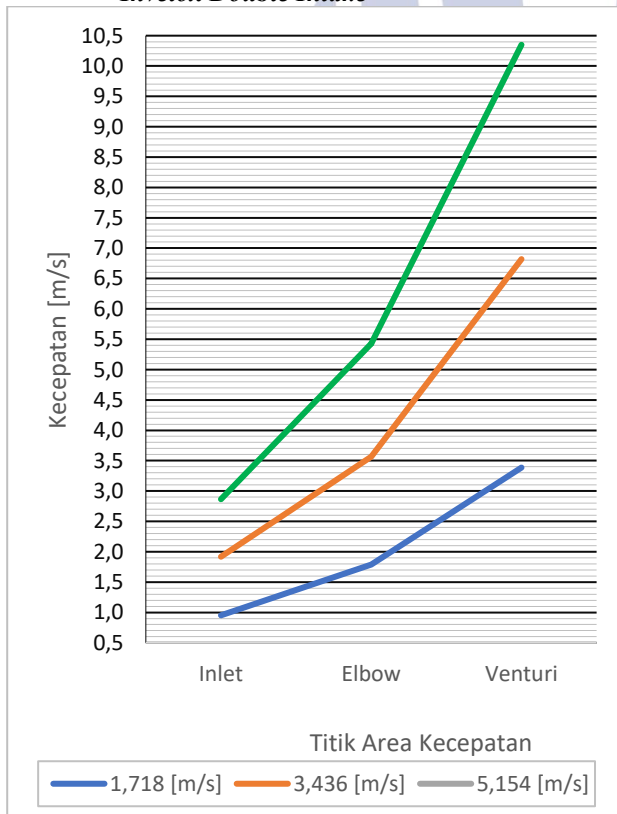
• Invelox Cover Rounded Lip



Gambar 13. Grafik Kecepatan pada Modifikasi *Invelox Cover Rounded Lip*

Pada seluruh variasi kecepatan Inlet, terlihat adanya peningkatan kecepatan dari titik Inlet menuju Elbow, dan peningkatan yang jauh lebih signifikan saat mencapai Venturi. Misalnya, pada kecepatan Inlet 1,718 m/s, kecepatan di Venturi meningkat hingga sekitar 3,2 m/s, sedangkan pada Inlet 3,436 m/s, kecepatan mencapai sekitar 6,5 m/s di Venturi. Peningkatan paling tajam terjadi pada kecepatan Inlet tertinggi (5,154 m/s), di mana kecepatan pada titik Venturi mencapai hampir 10 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa desain Cover Rounded Lip secara efektif mempercepat aliran udara seiring meningkatnya kecepatan masuk, terutama di area Venturi yang berfungsi sebagai daerah konvergen untuk memaksimalkan akselerasi aliran. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa desain ini mampu meningkatkan kecepatan aliran secara signifikan pada bagian hilir, khususnya pada kecepatan Inlet yang lebih tinggi.

- **Invelox Double Intake**

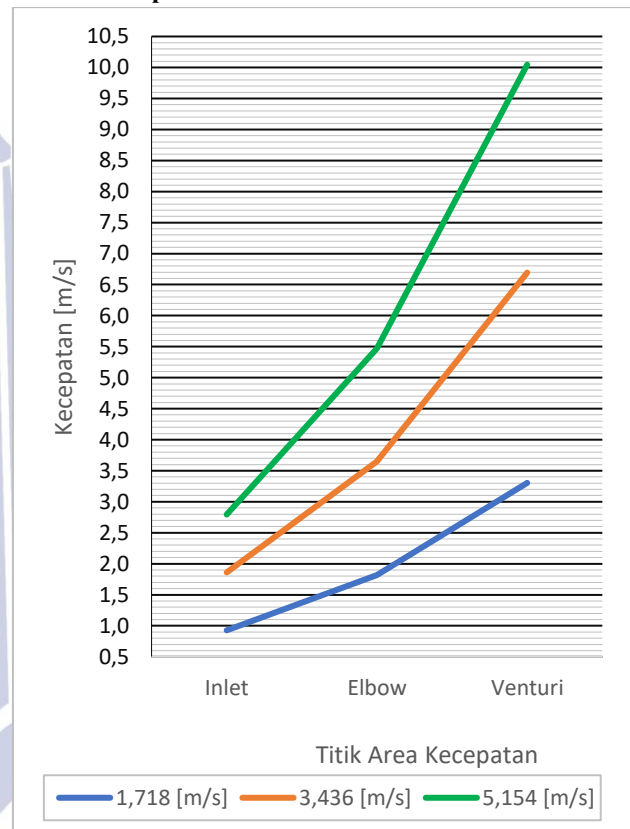


Gambar 14. Grafik Kecepatan pada Modifikasi *Invelox Double Intake*

Pada seluruh variasi kecepatan, terlihat pola peningkatan kecepatan yang konsisten dari Inlet menuju Elbow, serta peningkatan yang jauh lebih signifikan dari Elbow menuju Venturi. Sebagai contoh, pada kecepatan Inlet 1,718 m/s, kecepatan mencapai sekitar 3,3 m/s di Venturi. Pada kecepatan Inlet 3,436 m/s, kecepatan meningkat tajam menjadi sekitar 6,7 m/s, dan pada kecepatan tertinggi 5,154 m/s, kecepatan di Venturi mencapai lebih dari 10 m/s. Hal ini

menunjukkan bahwa desain Double Intake secara efektif mempercepat aliran seiring bertambahnya kecepatan Inlet, terutama di bagian Venturi yang berfungsi sebagai area konvergen untuk memfokuskan aliran. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa performa desain ini sangat bergantung pada besarnya kecepatan Inlet, dan menunjukkan efisiensi akselerasi yang tinggi di bagian hilir saluran.

- **Invelox Double Intake dan Cover Rounded Lip**



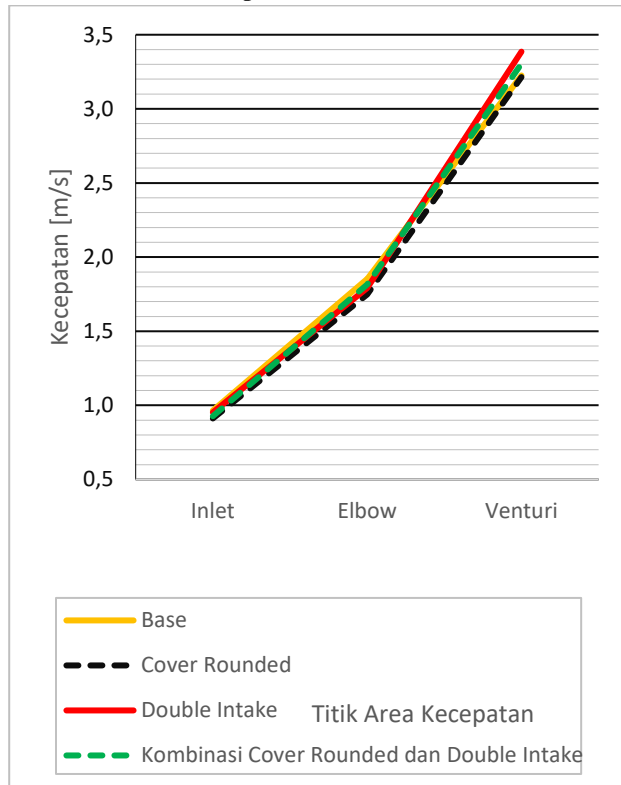
Gambar 15. Grafik Kecepatan pada Modifikasi *Invelox Kombinasi Cover Rounded Lip dan Double Intake*

Pada seluruh variasi kecepatan, terlihat pola peningkatan kecepatan yang konsisten dari Inlet menuju Elbow, serta peningkatan yang jauh lebih signifikan dari Elbow menuju Venturi. Sebagai contoh, pada kecepatan Inlet 1,718 m/s, kecepatan di Venturi meningkat hingga sekitar 3,3 m/s. Pada kecepatan Inlet 3,436 m/s, aliran mencapai sekitar 6,7 m/s, dan pada kecepatan tertinggi 5,154 m/s, kecepatan di Venturi mencapai lebih dari 10 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa desain Invelox kombinasi Double Intake dan Cover Rounded Lip secara efektif mengarahkan dan mempercepat aliran, terutama di area Venturi yang merupakan titik konvergen aliran. Kombinasi dua fitur geometris ini tampak mampu bekerja sinergis dalam meningkatkan efisiensi akselerasi aliran. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa desain ini sangat responsif terhadap variasi kecepatan Inlet dan memiliki potensi besar

dalam meningkatkan performa pengambilan energi angin.

D. Analisa Pengaruh Desain dan Modifikasi *Invelox* antar Kecepatan

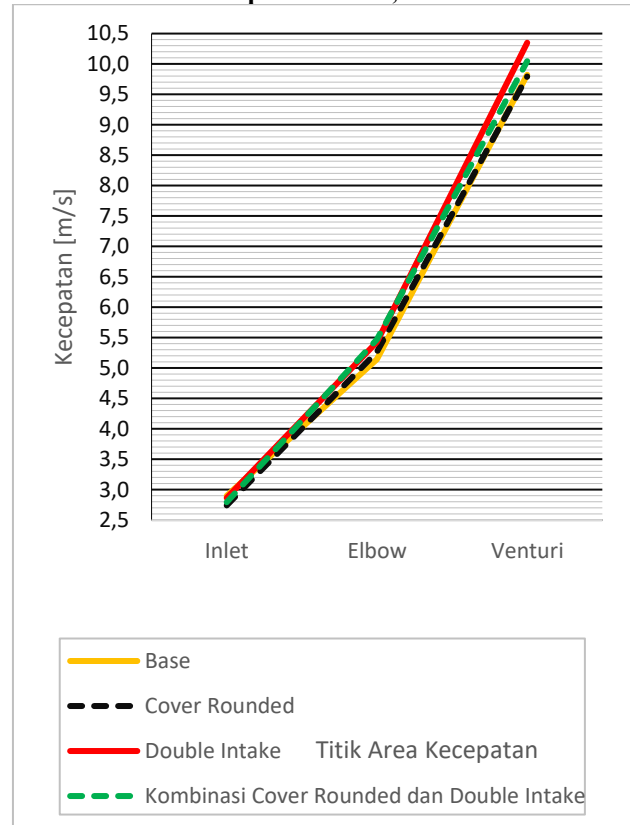
• Pada Kecepatan Inlet 1,718 m/s



Gambar 16. Pengaruh Desain dan Modifikasi *Invelox* pada Kecepatan Inlet 1,718 m/s

Berdasarkan hasil grafik, pada kecepatan Inlet sebesar 1,718 m/s, peningkatan kecepatan aliran pada seluruh desain *Invelox* mengikuti pola umum, yaitu kenaikan bertahap dari Inlet ke Elbow, dan peningkatan yang lebih tajam saat memasuki Venturi, sesuai dengan prinsip laju aliran massa ($\dot{m} = \rho AV$). Pada kecepatan rendah ini, perbedaan antar desain belum terlalu mencolok. *Invelox* Double Intake menunjukkan kinerja paling baik dengan kecepatan tertinggi di area Venturi, menandakan bahwa saluran masuk ganda memungkinkan peningkatan volume udara yang dipercepat saat melewati penampang sempit. *Invelox* Kombinasi Double Intake dan Cover Rounded Lip berada tepat di bawahnya, menunjukkan bahwa penambahan elemen Cover Rounded belum memberikan dampak signifikan pada kecepatan aliran di kecepatan rendah. Adapun *Invelox* Base dan *Invelox* Cover Rounded menunjukkan performa yang lebih rendah akibat terbatasnya volume udara masuk, sehingga kecepatan di Venturi pun lebih kecil. Dengan demikian, pengaruh modifikasi baru mulai terlihat pada desain dengan tambahan Intake.

• Pada Kecepatan Inlet 5,154 m/s



Gambar 17. Pengaruh Desain dan Modifikasi *Invelox* pada Kecepatan Inlet 5,154 m/s

Berdasarkan hasil grafik, pada kecepatan Inlet sebesar 5,154 m/s, pola peningkatan kecepatan dari Inlet menuju Venturi semakin menonjol, menunjukkan efek pengaruh desain terhadap performa sistem menjadi semakin signifikan pada kecepatan tinggi. Seluruh desain mengalami lonjakan kecepatan yang tajam di area Venturi, sesuai prinsip $\dot{m} = \rho AV$, di mana peningkatan kecepatan merupakan hasil dari penyempitan area penampang dan penambahan massa udara. Desain Double Intake mencatat kecepatan tertinggi di area Venturi, mengindikasikan efisiensi yang sangat baik dalam memanfaatkan peningkatan debit massa melalui dua saluran masuk. Desain Kombinasi Double Intake dan Cover Rounded Lip masih menunjukkan kinerja yang sangat kompetitif dan tetap berada di bawah Double Intake dengan selisih kecil, menandakan bahwa penambahan Cover Rounded memberikan sedikit pengaruh terhadap pola percepatan aliran. Desain Base dan Cover Rounded kembali menunjukkan kecepatan yang lebih rendah dibanding desain lainnya, karena keterbatasan jumlah udara masuk yang menyebabkan peningkatan kecepatan tidak semaksimal desain dengan Intake ganda. Dengan demikian, pada kecepatan tinggi, keunggulan desain Double Intake semakin jelas, dan desain kombinasi tetap menunjukkan performa mendekati optimal, meskipun belum

melampaui efektivitas Double Intake dalam mempercepat aliran udara.

PENUTUP

Simpulan

- Desain Invelox Base menunjukkan kemampuan mempercepat aliran secara signifikan, dengan kecepatan maksimum tercapai di Throat Venturi. Tekanan menurun secara konsisten dari Inlet ke Outlet, sesuai prinsip Bernoulli, menandakan konversi tekanan menjadi energi kinetik berlangsung efektif. Kontur kecepatan menunjukkan peningkatan tajam di Venturi, namun aliran cenderung menyebar dan kurang terfokus setelah Elbow. Kontur tekanan relatif merata di Inlet, lalu menurun di Venturi. Pola streamline menunjukkan aliran yang menyebar ke arah dinding saluran, terutama setelah elbow, yang menandakan adanya penyimpangan arah aliran akibat distribusi kecepatan yang tidak merata.
- Desain Invelox dengan Cover Rounded Lip menunjukkan peningkatan kecepatan angin di venturi yang tetap signifikan, meskipun sedikit lebih rendah dibandingkan Invelox Base. Aliran tetap mengalami percepatan dari inlet ke outlet, dengan penurunan tekanan yang halus dan stabil sesuai prinsip Bernoulli. Kontur kecepatan menunjukkan aliran yang lebih halus dan terarah di awal, namun kurang terkonsentrasi di venturi. Pola streamline memperlihatkan aliran yang lebih sejajar saat masuk, namun jumlah dan fokus aliran yang menuju venturi lebih terbatas, sehingga percepatan kurang optimal dibanding Invelox Base. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun aliran lebih halus, fokus percepatan kurang optimal dibanding Invelox Base.
- Desain Invelox dengan Double Intake menunjukkan peningkatan kecepatan dan penurunan tekanan yang paling signifikan di antara semua konfigurasi. Kecepatan di venturi tercatat paling tinggi, menunjukkan efisiensi pengumpulan dan percepatan aliran yang sangat baik. Tekanan pada Venturi juga menurun lebih besar, menandakan percepatan aliran yang lebih optimal sesuai prinsip Bernoulli. Kontur kecepatan menunjukkan area kecepatan tinggi yang lebih luas di Throat Venturi. Kontur tekanan menggambarkan penurunan tekanan yang stabil dari Inlet hingga Venturi dengan sebaran yang lebih baik dari pada Invelox Base dan Cover Rounded Lip. Pola streamline pada desain ini tampak lebih terarah dan rapi, dengan aliran yang menyatu secara efisien dari Double Intake dan lebih fokus ke tengah saluran. Hal ini menunjukkan kestabilan aliran yang baik dan efisiensi percepatan yang lebih tinggi dibandingkan desain lainnya.
- Desain Invelox dengan kombinasi Double Intake dan Cover Rounded Lip memberikan peningkatan kecepatan dan penurunan tekanan yang signifikan di Venturi, meskipun kecepatan maksimumnya sedikit lebih rendah dibanding Double Intake. Kontur kecepatan menunjukkan aliran yang merata dan halus, namun kurang fokus di Throat. Kontur tekanan memperlihatkan transisi yang stabil dari Inlet ke Venturi. Pola streamline sangat terarah dan terkonsentrasi, menunjukkan aliran masuk yang lebih terarah daripada Invelox Double Intake dan Invelox Base. Desain ini unggul dalam kestabilan aliran meskipun efisiensi percepatannya sedikit berkurang.
- Desain modifikasi Double Intake meningkatkan kinerja Invelox secara signifikan dalam mempercepat aliran udara. Dengan adanya dua jalur masuk, volume udara yang tertangkap menjadi lebih besar, sehingga debit massa udara yang masuk ke saluran meningkat. Aliran dari kedua jalur intake kemudian menyatu secara terarah di bagian Elbow, menghasilkan pola streamline yang rapi dan stabil. Efeknya, percepatan aliran di Venturi menjadi lebih tinggi, terbukti dari kecepatan maksimum yang konsisten lebih besar dibanding desain lainnya. Dengan demikian, desain Double Intake efektif dalam mengoptimalkan penangkapan dan akselerasi aliran udara dalam sistem Invelox.
- Desain modifikasi Cover Rounded Lip meningkatkan kinerja Invelox dalam hal penangkapan dan pengaturan aliran udara di inlet dengan memanfaatkan efek Coanda, yaitu kecenderungan aliran udara mengikuti permukaan melengkung. Bentuk cover yang membulat di bagian atas inlet ini memungkinkan aliran dari arah horizontal maupun atas diarahkan masuk secara halus dan stabil, sekaligus mencegah terbentuknya aliran keluar di bagian atas seperti pada desain invelox base. Aliran yang masuk menjadi lebih teratur dan minim turbulensi, namun karena mengikuti kontur cover, arah masuknya menjadi lebih menyebar dan tidak seluruhnya terfokus ke dalam saluran. Akibatnya, meskipun volume udara yang masuk meningkat dan distribusinya lebih merata, percepatan di Venturi sedikit berkurang karena energi aliran tidak terkonsentrasi sepenuhnya ke jalur utama.

Saran

- Disarankan agar pada penelitian berikutnya dilakukan simulasi atau pengujian langsung dengan jenis turbin angin tertentu yang dipasang pada Outlet Venturi. Hal ini penting untuk mengetahui jenis turbin yang paling sesuai dengan karakteristik aliran dari masing-masing

desain Invelox serta untuk mengevaluasi efisiensi konversi energi secara langsung.

- Selain simulasi numerik, pengujian secara eksperimental dalam skala laboratorium atau prototipe skala kecil dapat dilakukan untuk memvalidasi hasil simulasi dan mendapatkan gambaran nyata tentang performa sistem.
- Disarankan pada desain modifikasi cover rounded lip, peneliti berikutnya dapat mengeksplorasi bentuk alternatif, seperti profil semi-parabolik atau elips memanjang, sebagai pengganti lengkungan penuh pada Cover Rounded Lip. Dengan profil yang lebih landai di bagian awal dan semakin curam di bagian akhir. Bentuk ini berpotensi meningkatkan fokus dan konsentrasi aliran menuju Venturi, sehingga diharapkan menghasilkan percepatan aliran yang lebih optimal tanpa mengorbankan kestabilan pola streamline.
- Disarankan agar penelitian selanjutnya melakukan studi lebih lanjut untuk menentukan ukuran diameter kelengkungan (radius of curvature) dan sudut optimal pada bagian Elbow. Variasi parameter ini perlu dianalisis guna mengidentifikasi kombinasi geometri yang mampu meminimalkan separasi aliran dan zona recirculation, serta menjaga kontinuitas dan kestabilan aliran saat melalui tikungan. Penentuan radius dan sudut tikungan yang tepat diharapkan dapat meningkatkan efisiensi percepatan aliran menuju Venturi.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada Ibu saya yang tiada henti untuk memberikan doa dan dukungan secara moril maupun finansial. Juga kepada Bapak Indra Herlamba Siregar, S.T., M.T. dan Bapak Dr. Aris Ansori, S.Pd., M.T.. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran untuk penelitian Skripsi ini

DAFTAR PUSTAKA

- Akour, S. N., & Bataineh, H. O. (2019). Design considerations of wind funnel concentrator for low wind speed regions. *AIMS Energy*, 7(6), 728–742. (<https://doi.org/10.3934/energy.2019.6.728>).
- Alkhalidi, A., Ahmad, B. D., & Khawaja, M. K. (2022). Novel INVELOX design with unique intake to improve wind capturing mechanism. *Results in Engineering*, 16. (<https://doi.org/10.1016/j.rinen-g.2022.100780>).
- Allaci, D., & Andreopoulos, Y. (2014). INVELOX: Description of a new concept in wind power and its performance evaluation. *Energy*, 69, 336–344. (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.03.021>)
- Anwar, M. S. (2008). PROYEK AKHIR PROYEK AKHIR RANCANG BANGUN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN PADA STASIUN PENGISIAN ACCU MOBIL LISTRIK JURUSAN TEKNIK ELEKTRO INDUSTRI POLITEKNIK ELEKTRONIKA NEGERI SURABAYA
- INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER SURABAYA 2008.
- Anonymous, Perkembangan Potensi EBT di Indonesia - Sucofindo. (2024, March 11). (<https://www.sucofindo.co.id/artikel-1/perkembangan-potensi-ebt-di-indonesia>).
- Aravindhan, N., Bibin, C., Ashok Kumar, R., Sai Kalyan, K., Sai Balaji, K., Kugan, R., Rajesh, K., & Arunkumar, S. (2023). Performance analysis of various types of ducted wind turbines – A review. *Materials Today: Proceedings*, 80, 188–194. (<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.240>)
- Brilliyananto, R. (2023, September 5). Mengenal Turbin Angin: Energi Terbarukan yang Menyegarkan. (<https://amf.or.id/mengenal-turbin-angin-energi-terbarukan-yang-menyegarkan/>).
- Ding, L. (2020). Study of Invelox wind turbine considering atmospheric boundary layer: Based on numerical simulation. *Journal of Physics: Conference Series*, 1600(1). (<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1600/1/012063>)
- Hosseini, S. R., & Ganji, D. D. (2020). A novel design of nozzle-diffuser to enhance performance of INVELOX wind turbine. *Energy*, 198. (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117082>)
- Rangkuti, M. (2023, July 31). Apa Itu Pembangkit Listrik Tenaga Angin? (<https://fatek.umsu.ac.id/apa-itu-pembangkit-listrik-tenaga-angin/>).
- Sotoudeh, F., Kamali, R., & Mousavi, S. M. (2019). Field tests and numerical modeling of INVELOX wind turbine application in low wind speed region. *Energy*, 181, 745–759. (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.186>).
- Taghinezhad, J., Masdari, M., Alimardani, R., & Mosazadeh, H. (2019). Ducted Wind Turbines A Review. (<http://ijfrcscc.org>).
- Wihatma Andianti, P., & Yushardi. (2022). POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN SEBAGAI ALTERNATIF PENERANGAN JALAN DI PANTAI BAMBANG KABUPATEN LUMAJANG. *Pariwisata Budaya: Jurnal Ilmiah Pariwisata Agama Dan Budaya*, 7(Vol. 7 No. 2 (2022): Volume 7 No 2), 123–130. (<http://ojs.uhnsugriwa.ac.id/index.php/parbud>)