

## Optimasi Desain *Trailing Edge Splitter* untuk Mengurangi Turbulensi dan *Pressure Drop* pada *Exhaust Silencer* Turbin Gas Menggunakan Metode CFD dan *Bayesian Optimization*

Ibrahim Basalamah<sup>1</sup>, Ahmad Atif Fikri<sup>1\*</sup>, Willyanto Anggono<sup>2</sup>, Dani Harmanto<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang  
Jl. Semarang 5, Malang 65145, Indonesia

<sup>2</sup> Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Kristen Petra  
Jl. Siwalankerto 121-131, Surabaya 60236, Indonesia

<sup>3</sup> School of Engineering and Sustainable Development, De Montfort University  
Leicester LE1 9BH, United Kingdom

\*Penulis korespondensi; E-mail: [atif.fikri.ft@um.ac.id](mailto:atif.fikri.ft@um.ac.id)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 22 Dec 2025

Revised 6 Mar 2026

Accepted 26 Sep 2026

Available online 30 Oct 2026

Communicated by Ahmad

Atif Fikri

**Keywords:** gas turbine, exhaust silencer, trailing edge optimization, computational fluid dynamics, Bayesian Optimization.

### ABSTRACT

*Gas turbines are widely used in modern power generation due to their high efficiency and flexibility. However, using exhaust silencers in exhaust gas systems can increase back pressure, reducing overall turbine performance. The aerodynamic behavior of the splitter inside the exhaust silencer, especially at the trailing edge, significantly affects pressure drop and turbulence intensity. This study aims to optimize the trailing edge geometry of a GE Frame 6FA exhaust silencer splitter using a combination of computational fluid dynamics (CFD) and Bayesian optimization (BO). CFD simulations were conducted in ANSYS Fluent using a poly-hexcore mesh, while the optimization employed a Gaussian process (GP) surrogate model with an expected improvement (EI) acquisition function. Seven trailing edge angles (5°–20°) were evaluated to observe the aerodynamic trade-off between pressure drop and turbulent kinetic energy (TKE). The optimal configuration was found at 13.9°, yielding a TKE of 0.43 J/kg and a pressure drop of 18.38 Pa, well below the industrial allowable pressure drop limit of 34 Pa. The results confirm that the BO-GP framework effectively reduces computational cost while achieving a more aerodynamically balanced silencer design.*

This is an open access article under the [CC BY](#) license



## PENDAHULUAN

Kebutuhan energi global terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk, urbanisasi, dan industrialisasi, di tengah upaya transisi menuju sistem energi rendah emisi. Menurut *Energy Institute* [1], turbin gas berkontribusi sekitar 23% dari total pembangkitan listrik dunia, menjadikannya sumber energi terbesar kedua setelah batubara. Efisiensi termal turbin gas siklus gabungan modern dapat mencapai hingga 64% [2], jauh lebih tinggi dibandingkan pembangkit uap konvensional berbahan batubara yang berkisar antara 33–40% [3]. Fleksibilitas operasionalnya juga menjadi keunggulan utama, karena mampu beroperasi cepat (*fast-start capability*) dan menyesuaikan beban listrik secara dinamis. Kondisi ini menjadikan turbin gas

tulang punggung sistem pembangkit modern dalam mendukung integrasi energi terbarukan yang bersifat fluktuatif [4]. Studi terkini menunjukkan bahwa pemasangan *silencer* (termasuk konstruksi *splitter/baffle internal*) pada saluran gas turbin industri menambah hambatan aliran sehingga *pressure drop* meningkat [5], [6]. Selain itu, desain *silencer* dengan *baffle internal* meningkatkan turbulensi aliran sebagaimana terbukti dari kenaikan *turbulent kinetic energy* (TKE) di sekitar perforasi dan celah *silencer*. Desain *silencer* konvensional umumnya menggunakan *baffle* (panel penyerap) yang tebal dan rapat untuk meredam frekuensi rendah, tetapi hal ini memperkecil area alir, meningkatkan kecepatan gas, dan secara tak terhindarkan menaikkan *pressure drop* [6]. Oleh karena itu, optimasi bentuk *trailing edge splitter* menjadi krusial untuk menjaga efisiensi aliran tanpa mengorbankan fungsi peredaman *silencer*.

Geometri ujung belakang (*trailing edge*) *splitter* memengaruhi pola aliran dalam *silencer*. Ujung tajam atau mendadak cenderung menimbulkan pemisahan aliran yang kuat dan pembentukan *wake* besar, sehingga meningkatkan turbulensi dan TKE [7]. Sebaliknya, ujung belakang yang melengkung atau diruncingkan dapat membantu menjaga aliran tetap terpasang [8]. Hassan dkk. [8] menunjukkan bahwa konfigurasi *trailing edge* seperti *serrated*, *comb*, dan *comb-serrated* memberikan dampak signifikan terhadap pola aliran, distribusi tekanan, dan energi turbulen. Desain *serrated* menghasilkan peningkatan kecepatan aliran dan penurunan tekanan, sementara konfigurasi *comb* memicu separasi aliran di akar *trailing edge*, yang mengindikasikan peningkatan TKE. Sebaliknya, *trailing edge* tipe *comb-serrated* menunjukkan pola aliran paling stabil dengan distribusi tekanan dan gradien kecepatan yang lebih merata, sehingga berpotensi menurunkan TKE secara keseluruhan dibanding desain *baseline*. Studi lain menunjukkan bahwa modifikasi tepi *trailing* seperti serpihan *serrated* menghasilkan pusaran kontra-rotasi yang memindahkan pusaran pemisahan ke hulu, sehingga secara signifikan menurunkan TKE di belakang (*wake*) tepi *trailing* [9], [10]. Sementara itu, pendekatan geometris seperti menghaluskan (*rounding*) ujung *trailing* serta optimasi tata letak *baffle silencer* juga terbukti meningkatkan performa aliran [11], [12].

Simulasi CFD terbukti mampu merepresentasikan perilaku aliran gas buang secara akurat, dengan memprediksi parameter seperti karakteristik aliran, laju aliran, sekaligus menyediakan visualisasi aliran yang mendukung optimasi desain *silencer* [13]. Tanriver [13] menggunakan model RANS ( $k-\epsilon$ ) dan menemukan bahwa CFD mampu memprediksi hambatan aliran (*airflow resistance*) dalam *silencer* dengan cukup akurat. Namun, akurasi penuh CFD bergantung pada kualitas *mesh* dan model turbulensi [13]. Selain itu, melakukan simulasi CFD untuk setiap variasi sudut atau bentuk *trailing edge* memerlukan banyak waktu komputasi. Akibatnya, meskipun CFD berguna untuk analisis awal, efisiensinya dalam mengevaluasi beragam desain *splitter* terbatas oleh kebutuhan melakukan iterasi manual yang mahal. Untuk mempercepat pencarian desain optimal, diperlukan metode optimasi cerdas (surrogat atau *data-driven*) yang dapat mengarahkan eksplorasi geometri tanpa harus mensimulasikan setiap kandidat secara terpisah.

Metode *Bayesian optimization* (BO) berbasis *Gaussian process* (GP) dapat digunakan untuk mencari konfigurasi *trailing edge splitter* yang optimal dengan cara yang sangat efisien. BO membangun model probabilistik surrogat (GP) dari hasil simulasi awal, lalu secara iteratif memilih desain berikutnya untuk diuji, sehingga jumlah simulasi CFD yang diperlukan diminimalkan [14]. Pendekatan ini telah terbukti efektif untuk masalah CFD yang kompleks. Misalnya, Morita dkk. [15] menerapkan BO-GPR pada beberapa kasus optimasi aliran, dan menemukan bahwa solusi optimal untuk hingga delapan parameter desain dapat dicapai dengan kurang dari 90 kali simulasi CFD. Artinya, kombinasi CFD dengan BO dapat secara signifikan mengurangi beban komputasi dibandingkan eksplorasi parameter tradisional. Dalam konteks *silencer* turbin gas, BO dapat diintegrasikan dengan parameter sudut dan bentuk *splitter* untuk simultan meminimalkan *pressure drop* dan TKE. Dengan demikian, kombinasi CFD dan BO digunakan pada penelitian ini untuk mencari desain *trailing edge* yang lebih efisien secara aerodinamika berdasarkan kedua parameter tersebut. Batasan penelitian ini adalah evaluasi difokuskan pada kinerja aerodinamika *exhaust silencer*, yaitu *pressure drop* dan TKE. Kinerja akustik, seperti *insertion loss*, *transmission loss*, dan tingkat reduksi kebisingan, tidak dimodelkan maupun divalidasi. Oleh karena itu, hasil optimasi pada penelitian ini tidak digunakan untuk menyimpulkan peningkatan atau penurunan performa akustik *silencer*.

## METODE

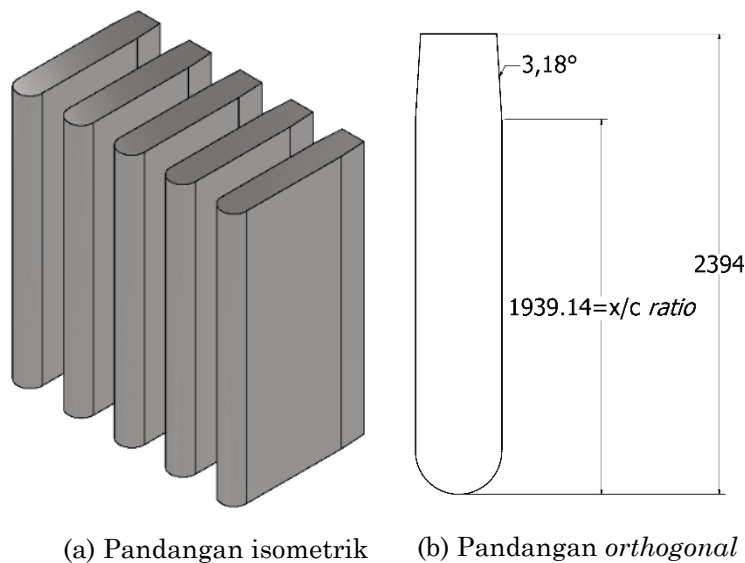
Model komputasi dipilih menggunakan kerangka *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) yang dibagi menjadi tiga tahapan yaitu *pre-processing*, *numerical computation*, dan *post-processing*. Pada tahap pertama yaitu *pre-processing*, geometri dari *frame splitter* dibuat menggunakan perangkat lunak *computer aided design* (CAD) Ansys Spaceclaim 2023 R1. Pembentukan *mesh* dilakukan menggunakan ANSYS Fluent Meshing 2023 R1 dengan tipe *poly-hexcore*. Selanjutnya, persamaan aliran diselesaikan di ANSYS Fluent 2023 R1 menggunakan *Finite Volume Method* (FVM). Tahap *post-processing* digunakan untuk mengevaluasi karakteristik aliran dari setiap variasi geometri. Geometri utama dari *frame splitter* terdiri atas rasio  $x/c$  dan sudut kemiringan *trailing edge*. Rasio  $x/c$  merupakan perbandingan antara panjang *trailing edge* ( $x$ ) terhadap panjang keseluruhan *splitter* atau *chord length* ( $c$ ), yang berperan penting dalam menentukan karakteristik penajaman *trailing edge* serta pengaruh aerodinamis di area hilir. Pada penelitian ini, nilai rasio  $x/c$  ditetapkan secara konstan sebesar 0,81, yang diperoleh dari hasil pembagian panjang *trailing edge* ( $x = 1939,14$  mm) terhadap panjang total *splitter* ( $c = 2394$  mm). Spesifikasi dari *frame splitter* ditampilkan pada Tabel 1 dan geometrinya pada Gambar 1.

Variasi sudut *trailing edge* ( $\alpha$ ) pada *splitter silencer* dirancang untuk mengevaluasi pengaruh geometris terhadap distribusi tekanan dan turbulensi aliran. Gambar 2 menunjukkan skematik variasi bentuk *trailing edge* dari sudut  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ , hingga  $20^\circ$ , yang dibangun dari titik ujung *trailing* ke arah bawah dengan rasio  $x/c$  tetap 0,81 (1939,14 mm). Meskipun visualisasi awal hanya mencakup empat sudut utama tersebut, dalam proses simulasi juga disertakan tiga variasi sudut tambahan, yaitu  $7,5^\circ$ ,  $12,5^\circ$ , dan  $17,5^\circ$ , guna meningkatkan resolusi parameter dan akurasi dalam proses optimasi berbasis *Gaussian process*. Dengan demikian, total tujuh konfigurasi sudut  $\alpha$  digunakan sebagai data masukan dalam studi parametrik dan pembangunan model *surrogate Bayesian Optimization*.

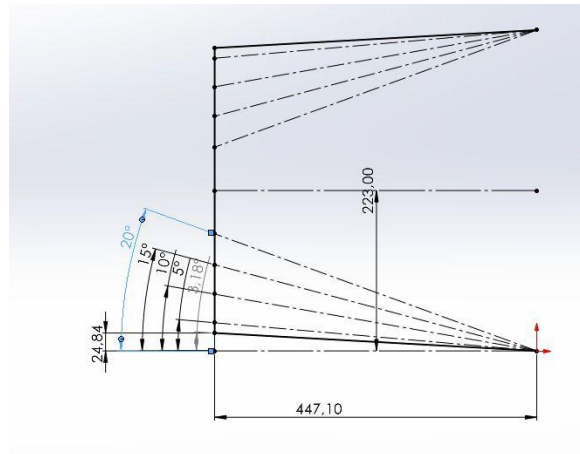
Domain komputasi mencakup keseluruhan *exhaust silencer*, mulai dari *inlet*, celah aliran di antara *splitter*, hingga *outlet*. Zona aliran utama didefinisikan sebagai *fluid cell zone* atau *control volume* (CV). Berdasarkan pengecekan ulang terhadap riwayat *monitor* dan *output parameter* ANSYS Fluent yang digunakan untuk membentuk data pada Tabel 4 di Bab 3, perhitungan CFD pada studi parametrik ini diperlakukan sebagai *steady-state* RANS.

Tabel 1. Spesifikasi *frame splitter*

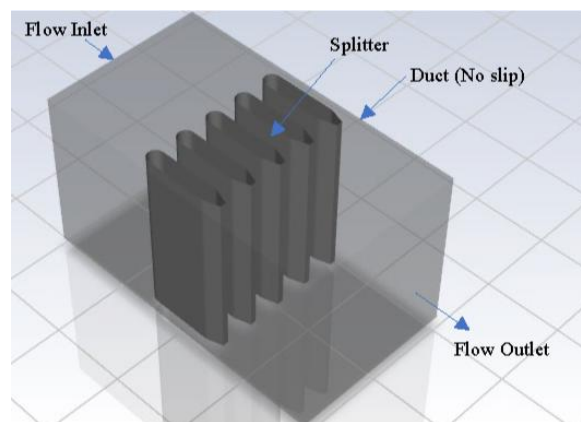
| Parameter                               | Nilai                  |
|-----------------------------------------|------------------------|
| Panjang <i>Splitter</i>                 | 2394 mm                |
| Rasio $x/c$                             | 0,81                   |
| Sudut <i>trailing edge</i> ( $\alpha$ ) | $5^\circ$ - $20^\circ$ |



Gambar 1. Geometri *frame splitter*: (a) pandangan isometrik; (b) pandangan *orthogonal* (mm)



Gambar 2. Skematik variasi sudut *trailing edge*



Gambar 3. Skema domain komputasi dan *boundary condition*

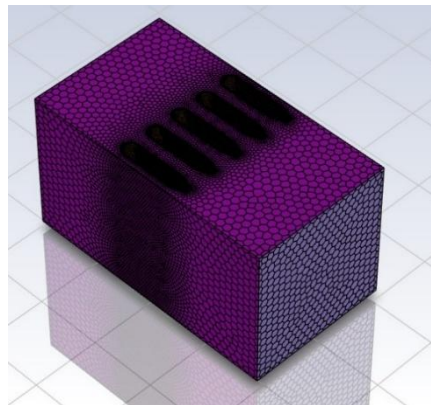
Model turbulensi yang digunakan adalah *realizable k-ε* dengan *enhanced wall treatment*. Diskretisasi tekanan menggunakan skema *second order*, sedangkan momentum, *turbulent kinetic energy*, dan *turbulent dissipation rate* menggunakan *second order upwind*. Konvergensi setiap *design point* dievaluasi dari kestabilan parameter monitor utama, terutama *pressure drop* dan *volume-averaged TKE*, hingga nilainya mencapai kondisi mendatar (*plateau*) terhadap iterasi *solver*. *Inlet* didefinisikan sebagai *mass-flow-inlet* sebesar 1000 ton/jam (277,78 kg/s) pada 640°C (913,15 K), sedangkan *outlet* didefinisikan sebagai *pressure-outlet* pada 0 Pa *gauge* (tekanan atmosfer). Permukaan *duct* dan *splitter* diperlakukan sebagai *wall* dengan kondisi *no-slip* dan adiabatik. Karena formulasi yang digunakan adalah *steady-state*, *physical time step* dan *Courant number* tidak digunakan sebagai parameter evolusi waktu pada simulasi ini. Gambar 3 menyajikan skema domain komputasi dan batas-batas aliran yang digunakan.

Pada Gambar 3, *splitter* tampak berongga karena konstruksi aktual merupakan *acoustic splitter* yang bagian dalamnya diisi material insulasi dan sisi-sisinya ditutup *perforated plate*. Dalam model CFD aerodinamika ini, rongga, material insulasi, dan perforasi tidak dibentuk sebagai zona aliran terpisah; penetrasi *mean flow* ke dalam *acoustic core* diabaikan dan permukaan luar *splitter* yang berhadapan dengan aliran utama direpresentasikan sebagai *wall boundary*. Dengan demikian, istilah “*solid*” pada versi sebelumnya diganti menjadi “*wall*” agar konsisten dengan terminologi *control volume* dan *control surface*.

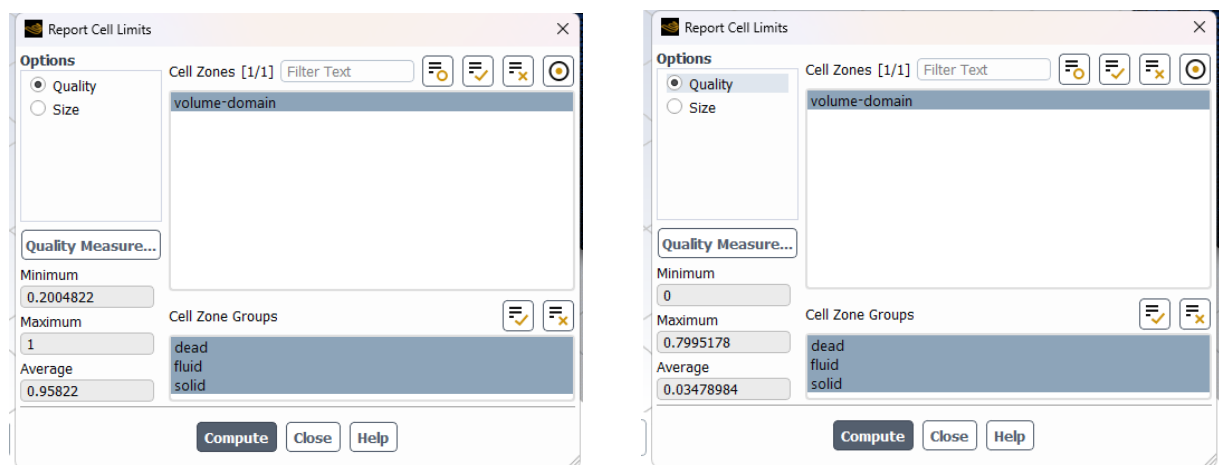
Proses selanjutnya adalah pembentukan *mesh* dengan pendekatan *poly-hexcore*, yaitu kombinasi elemen heksaedral kartesian pada bagian inti domain dan elemen polihedral tak berstruktur di sekitar geometri yang lebih kompleks. Kerapatan *mesh* ditingkatkan secara lokal di sekitar dinding dan *trailing edge splitter* untuk menangkap gradien kecepatan dan tekanan dengan lebih baik [16]. Strategi dan parameter *meshing* yang sama diterapkan pada seluruh variasi geometri

agar perbandingan antar-desain tetap konsisten. Uji independensi *grid* formal menggunakan beberapa tingkat kerapatan *mesh* tidak dilakukan karena ruang lingkup awal penelitian difokuskan pada penyaringan komparatif beberapa geometri dan optimasi BO dengan satu strategi *mesh* yang konsisten. Konsekuensinya, ketidakpastian akibat diskritisasi *grid* belum dapat dikuantifikasi dan diperlakukan sebagai salah satu keterbatasan penelitian. Hasil visualisasi pembentukan mesh poly-hexcore tersebut disajikan pada Gambar 4.

Kualitas *volume mesh* dievaluasi menggunakan dua parameter, yaitu *orthogonal quality* dan *skewness* pada *cell zone volume-domain*. Evaluasi dilakukan menggunakan fasilitas *report cell limits* pada ANSYS Fluent untuk memperoleh nilai minimum, maksimum, dan rata-rata dari masing-masing parameter kualitas *mesh*. Hasil evaluasi *orthogonal quality* menunjukkan nilai minimum sebesar 0,2005, maksimum 1,0000, dan rata-rata 0,9582. Sementara itu, evaluasi *Skewness* menghasilkan nilai minimum 0,0000, maksimum 0,7995, dan rata-rata 0,0348, sebagaimana dirangkum pada Tabel 2 dan divisualisasikan pada Gambar 5. Secara umum, nilai *orthogonal quality* yang semakin mendekati 1 dan nilai *skewness* yang semakin mendekati 0 menunjukkan kualitas elemen yang semakin baik. Berdasarkan hasil tersebut, sebagian besar elemen pada domain komputasi memiliki kualitas yang baik, meskipun terdapat sejumlah elemen lokal dengan kualitas yang lebih rendah dibandingkan nilai rata-rata. Hasil ini digunakan sebagai evaluasi kualitas *mesh* yang digunakan pada simulasi. Simulasi dilakukan di dalam domain *ducting exhaust silencer* yang direkonstruksi menyerupai kondisi aktual sistem saluran buang turbin gas. Untuk memperjelas definisi numeriknya, *interior-volume-domain* merupakan *control volume* (CV) berupa *fluid cell zone*, sedangkan *inlet*, *outlet*, dinding *duct*, dan permukaan *splitter* merupakan *control surface* (CS). Tabel 3 merangkum tipe zona dan kondisi batas yang diterapkan.



Gambar 4. Hasil pembentukan *mesh*



(a) Orthogonal quality

(b) Skewness

Gambar 5. Hasil evaluasi kualitas *volume mesh* pada *cell zone volume-domain*: (a) *Orthogonal Quality* dan (b) *Skewness*

Tabel 2. Ringkasan hasil evaluasi kualitas *mesh*

| Parameter                 | Minimum | Maksimum | Rata-rata |
|---------------------------|---------|----------|-----------|
| <i>Orthogonal Quality</i> | 0,2005  | 1,0000   | 0,9582    |
| <i>Skewness</i>           | 0,0000  | 0,7995   | 0,0348    |

Tabel 3. Ringkasan kondisi batas

| Wilayah / Zona                | Definisi CV/CS dan Kondisi Batas                                                                                                                      |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Interior-volume-domain</i> | CV: <i>Fluid cell zone</i> ; domain aliran utama gas buang                                                                                            |
| <i>Inlet</i>                  | CS: <i>Mass-flow-inlet</i> ; 1000 ton/jam (277,78 kg/s), 640°C (913,15 K)                                                                             |
| <i>Outlet</i>                 | CS: <i>Pressure-outlet</i> ; 0 Pa <i>gauge</i> (tekanan atmosfer)                                                                                     |
| <i>Duct</i>                   | CS: <i>Wall</i> ; <i>no-slip</i> ; adiabatik                                                                                                          |
|                               | CS: <i>Wall</i> ; <i>no-slip</i> ; adiabatik.                                                                                                         |
| <i>Splitter</i>               | <i>Acoustic core</i> berisi insulasi dan <i>perforated plate</i> tidak dimodelkan sebagai zona aliran terpisah; penetrasi <i>mean-flow</i> diabaikan. |

Optimasi desain *trailing edge* dilakukan menggunakan metode *Bayesian optimization* berbasis *Gaussian process* (BO-GP). Sebelum kedua metrik digabungkan, TKE dan *pressure drop* dinormalisasi menggunakan *z-score* terhadap tujuh titik CFD awal (Persamaan 1).

$$Z_{TKE} = \frac{TKE - \mu_{TKE}}{\sigma_{TKE}} \text{ dan } Z_{\Delta P} = \frac{\Delta P - \mu_{\Delta P}}{\sigma_{\Delta P}} \quad (1)$$

Fungsi objektif gabungan kemudian didefinisikan sebagai Persamaan (2)

$$J = 0,5Z_{TKE} + 0,5Z_{\Delta P} \quad (2)$$

sehingga kedua metrik memiliki bobot yang sama meskipun berbeda satuan; nilai J yang lebih rendah menunjukkan performa aerodinamika yang lebih baik. GP berperan sebagai *surrogate model* probabilistik yang memetakan hubungan antara variasi sudut *trailing edge* dan fungsi objektif serta memperkirakan ketidakpastian prediksi pada setiap titik desain. Algoritma BO menggunakan fungsi akuisisi *expected improvement* (EI) untuk menentukan kandidat evaluasi berikutnya secara adaptif. Hasil tujuh konfigurasi awal digunakan untuk membangun model GP, kemudian kandidat 13,9° yang disarankan EI dievaluasi kembali dengan CFD dan dibandingkan terhadap sampel awal [17].

Penilaian kualitas hasil CFD dilakukan melalui verifikasi numerik dan pemeriksaan kewajaran fisis. Studi Deng dkk. [18] dan Chmielewski dkk. [5] digunakan sebagai rujukan metodologis untuk interpretasi pola aliran, turbulensi, dan rugi tekanan, bukan sebagai validasi langsung terhadap geometri pada penelitian ini. Selain itu, *Technical Proposal* PT Baltec Exhaust dan Inlet System Indonesia menetapkan *allowable pressure drop exhaust silencer* GE Frame 6FA sebesar 0,34 mbar ( $\approx 34$  Pa). Nilai 34 Pa tersebut digunakan sebagai kriteria penerimaan desain (*engineering design criterion*), bukan sebagai bukti validasi akurasi numerik. Dengan demikian, hasil CFD dinilai memenuhi persyaratan tekanan balik apabila nilai *pressure drop* berada di bawah batas tersebut. Evaluasi terhadap algoritma *Bayesian optimization* dilakukan dengan membandingkan performa desain optimum terhadap seluruh titik sampel *trailing edge* yang disimulasikan. Efektivitas GP sebagai *surrogate model* dievaluasi dari kemampuannya mengarahkan proses akuisisi menuju konfigurasi dengan nilai fungsi objektif yang lebih rendah. Kurva *best-so-far* terhadap iterasi akuisisi BO digunakan untuk menunjukkan kecenderungan konvergensi optimasi.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Kualitas *mesh* dievaluasi berdasarkan *mesh metrics* dan jumlah sel. Hasil pelaporan menunjukkan nilai kualitas rata-rata sebesar 0,9582 (maksimum 1,0) dengan total 488.399 sel.

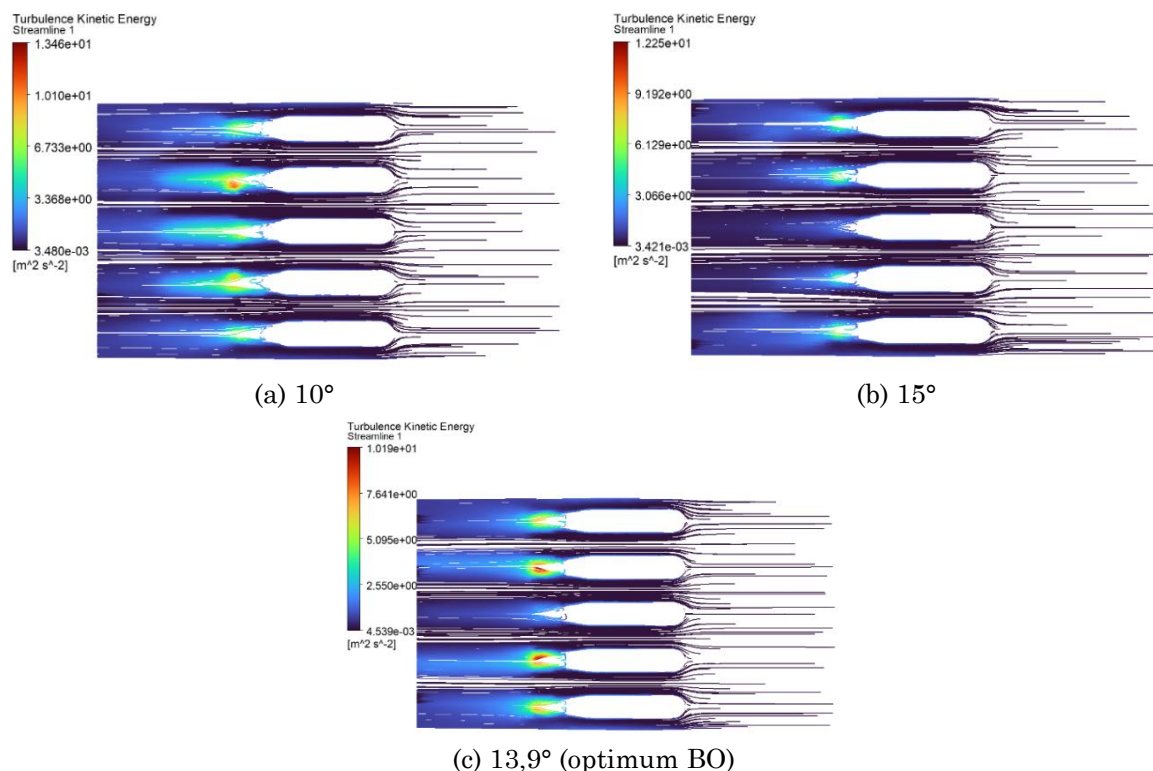
Nilai tersebut menunjukkan bahwa *mesh* yang digunakan memiliki kualitas elemen yang baik untuk perhitungan pada geometri yang dianalisis. Selain itu, monitor *pressure drop* dan TKE menunjukkan kecenderungan menuju nilai stabil pada *grid* yang digunakan. Pemeriksaan ini digunakan sebagai verifikasi numerik terhadap *grid* terpilih; karena data beberapa tingkat kerapatan *grid* tidak tersedia pada studi ini, hasil tersebut tidak diklaim sebagai uji *grid independence* formal.

### Pengaruh Sudut *Trailing edge* terhadap *Pressure Drop* dan TKE

Geometri *trailing edge* berperan penting dalam membentuk pola aliran dan tingkat turbulensi, sehingga memengaruhi *pressure drop* dan TKE. Studi berbasis CFD multi-objektif menunjukkan bahwa variasi sudut *trailing edge* menghasilkan *trade-off*: sudut lebih tajam cenderung mengurangi turbulensi namun meningkatkan *pressure drop*, sedangkan sudut lebih besar menurunkan tekanan balik namun menimbulkan *wake* turbulen lebih kuat [19]. Hasil simulasi pada Tabel 4 menunjukkan bahwa konfigurasi sudut menengah, khususnya hasil optimasi BO di 13,9°, menghasilkan nilai terbaik dengan TKE 0,432 J/kg dan *pressure drop* 18,379 Pa—lebih rendah dari sebagian besar varian awal dan konsisten dengan prinsip *Pareto front* dalam desain multi-objektif.

Tabel 4. Hasil simulasi CFD untuk variasi sudut *trailing edge* yang diuji

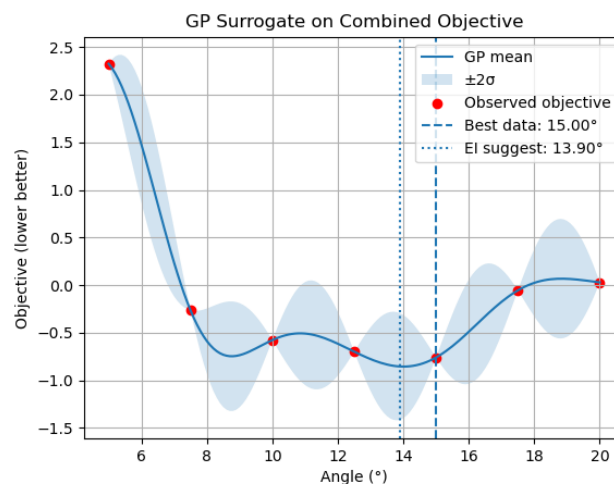
| Sudut <i>trailing edge</i> (°) | Energi Kinetik Turbulen (TKE, J/kg) | <i>Pressure drop</i> (Pa) |
|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| 5,0                            | 1,31                                | 24,70                     |
| 7,5                            | 0,53                                | 19,87                     |
| 10,0                           | 0,53                                | 18,64                     |
| 12,5                           | 0,46                                | 18,63                     |
| 15,0                           | 0,47                                | 18,28                     |
| 17,5                           | 0,56                                | 20,49                     |
| 20,0                           | 0,66                                | 20,09                     |
| <i>Optimum BO (13,9°)</i>      | <i>0,43</i>                         | <i>18,38</i>              |



Gambar 6. Perbandingan *streamline* berdasarkan distribusi *turbulent kinetic energy* (TKE) pada konfigurasi representatif: (a) Sudut 10°, (b) Sudut 15°, dan (c) Sudut optimum 13,9°.

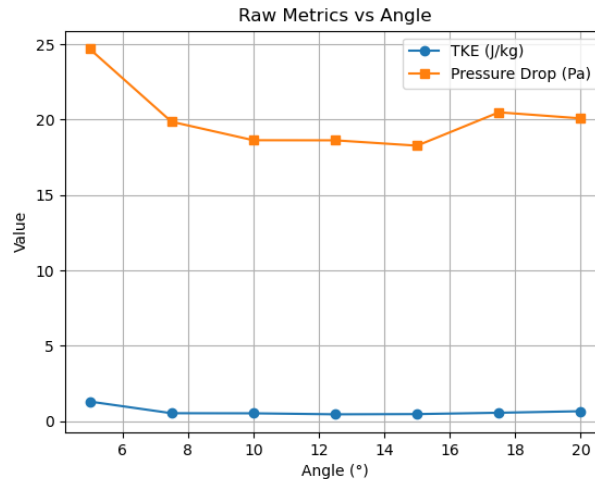
Pada tujuh konfigurasi awal yang disimulasikan, TKE terendah sebesar 0,458 J/kg diperoleh pada sudut 12,5°, sedangkan *pressure drop* minimum sebesar 18,277 Pa diperoleh pada sudut 15,0°. Setelah model surrogat BO-GP mengevaluasi ruang desain di antara titik-titik tersebut, konfigurasi 13,9° menghasilkan TKE 0,43 J/kg dan *pressure drop* 18,38 Pa, sehingga memberikan kompromi terbaik berdasarkan fungsi objektif gabungan. Hasil ini menunjukkan bahwa titik optimum tidak harus berimpit dengan titik sampel diskret yang memiliki *pressure drop* minimum. Seluruh konfigurasi menghasilkan *pressure drop* maksimum 24,70 Pa pada sudut 5°, yang masih berada di bawah kriteria desain 0,34 mbar ( $\approx 34$  Pa). Dengan demikian, semua variasi memenuhi batas tekanan balik yang ditetapkan, sementara pemilihan 13,9° didasarkan pada keseimbangan antara *pressure drop* dan TKE. Untuk mendukung hasil kuantitatif pada Tabel 4, Gambar 6 menyajikan visualisasi *streamline* yang diwarnai berdasarkan distribusi *Turbulent Kinetic Energy* (TKE) pada tiga konfigurasi representatif, yaitu sudut optimum 13,9°, sudut 10°, dan sudut 15°. Visualisasi menunjukkan adanya perbedaan intensitas dan distribusi TKE pada daerah di sekitar *trailing edge* dan zona *wake* untuk masing-masing konfigurasi. Konfigurasi optimum 13,9° menghasilkan TKE rata-rata terendah sebesar 0,432 J/kg dibandingkan sudut 10° sebesar 0,525 J/kg dan sudut 15° sebesar 0,473 J/kg. Perbandingan visual tersebut mendukung kecenderungan hasil kuantitatif pada Tabel 4 bahwa perubahan geometri *trailing edge* memengaruhi karakteristik turbulensi aliran.

### Mekanisme *Bayesian Optimization* Berbasis *Gaussian Process*



Gambar 7. Prediksi GP dan saran sudut optimal oleh EI

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7 (GP surrogate on combined objective), model GP berhasil memetakan hubungan antara sudut *trailing edge* dan nilai fungsi objektif gabungan (*pressure drop* dan TKE), sekaligus memvisualisasikan ketidakpastian prediksi melalui pita  $\pm 2\sigma$ . Observasi menunjukkan bahwa meskipun data terbaik berasal dari simulasi pada sudut 15°, algoritma EI menyarankan evaluasi pada sudut 13,9°, yang diprediksi memberikan peningkatan objektif lebih lanjut. Hasil ini mengindikasikan bahwa fungsi akuisisi EI mampu memandu proses optimasi secara efektif ke arah konfigurasi dengan potensi performa lebih baik. Gambar 8 (Raw Metrics vs Angle) menunjukkan tren individual dari *pressure drop* dan TKE terhadap variasi sudut *trailing edge*. Dapat diamati bahwa TKE mengalami penurunan signifikan hingga sudut 13,9°, sementara *pressure drop* sedikit meningkat, mencerminkan adanya *trade-off* yang kemudian dioptimalkan melalui pendekatan multi-objektif. Kombinasi kedua grafik tersebut menunjukkan efektivitas BO-GP dalam mengidentifikasi konfigurasi optimal dalam ruang desain terbatas secara efisien.



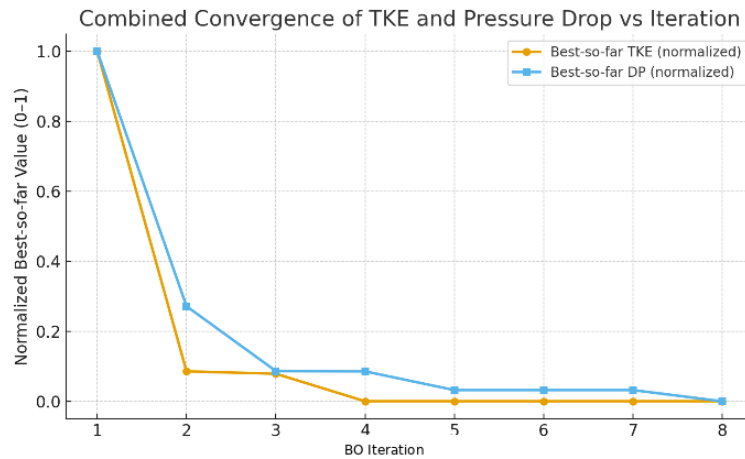
Gambar 8. Variasi *pressure drop* dan TKE terhadap sudut *trailing edge*

Dalam BO-GP, setiap konfigurasi desain diwakili oleh model *Gaussian process* (GP) yang dilatih dengan data simulasi sebelumnya. GP ini memprediksi rata-rata (*mean*) dan ketidakpastian (varian) fungsi objektif, sehingga memungkinkan evaluasi *surrogate* yang efisien [20]. Pada setiap iterasi, fungsi akuisisi (misalnya *expected improvement*, EI) dihitung berdasarkan prediksi GP untuk memilih titik desain berikutnya. EI memilih titik yang memberikan peningkatan yang diharapkan paling besar, sehingga secara prinsip menyeimbangkan eksplorasi (area dengan ketidakpastian tinggi) dan eksploitasi (area dengan prediksi kinerja baik) [21].

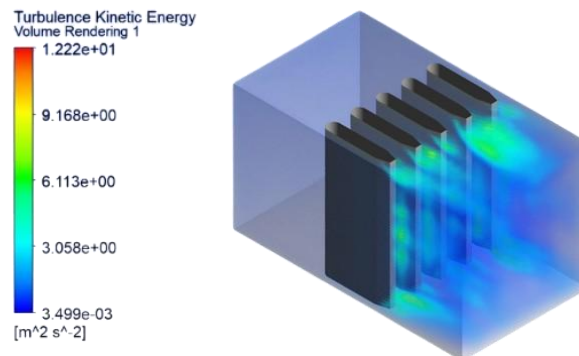
### Konvergensi *Bayesian Optimization* dan Desain Hasil Optimasi

Konvergensi proses *Bayesian Optimization* dievaluasi menggunakan tren *best-so-far* dari TKE dan *pressure drop* yang telah dinormalisasi. Sumbu x pada Gambar 9 menunjukkan iterasi akuisisi *Bayesian Optimization* (BO), bukan iterasi *solver* CFD maupun *time step*. Pada setiap iterasi BO, model GP diperbarui menggunakan data desain yang telah tersedia dan fungsi *Expected Improvement* digunakan untuk menentukan kandidat berikutnya. Kurva menurun tajam pada iterasi awal dan kemudian mendatar mendekati iterasi ke-7–8, yang menunjukkan bahwa perbaikan fungsi objektif semakin kecil dan proses optimasi mendekati konfigurasi terbaik di sekitar sudut 13,9°.

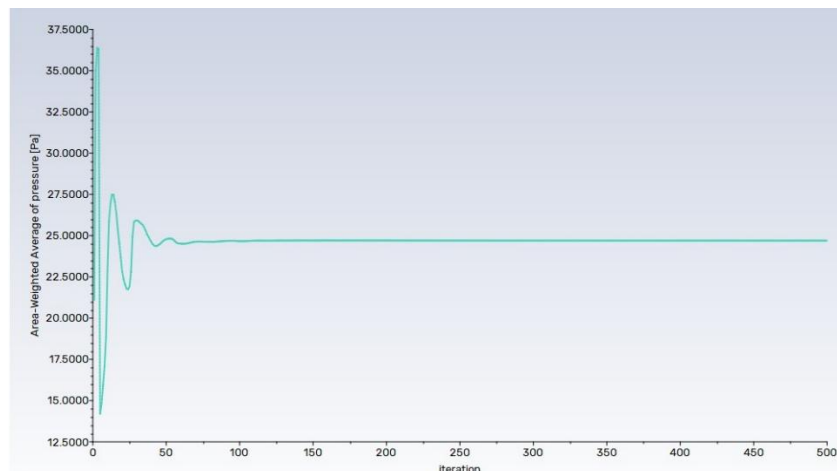
Simulasi CFD pada konfigurasi *trailing edge* hasil optimasi BO (13,9°) menghasilkan *pressure drop* 18,38 Pa dan TKE 0,43 J/kg. Meskipun sudut 15° memberikan  $\Delta P$  diskret terendah sebesar 18,28 Pa, selisih terhadap desain 13,9° hanya 0,10 Pa (sekitar 0,56%). Sebaliknya, TKE pada sudut 15° sebesar 0,47 J/kg, sekitar 9,5% lebih tinggi daripada nilai pada 13,9°. Oleh karena itu, berdasarkan fungsi objektif gabungan yang meminimalkan kedua parameter, sudut 13,9° dipilih sebagai desain akhir karena memberikan keseimbangan aerodinamika yang lebih baik antara rugi tekanan dan tingkat turbulensi.



Gambar 9. Tren *best-so-far* TKE dan *pressure drop* terhadap iterasi akuisisi *Bayesian optimization*



Gambar 10. Visualisasi *volume rendering* dari distribusi energi kinetik turbulen (TKE) pada Desain Optimum



Gambar 11. Contoh riwayat konvergensi *pressure drop* terhadap iterasi *solver steady-state* ( $\alpha = 5^\circ$ )

Sebagai pelengkap, Gambar 10 menyajikan distribusi TKE pada konfigurasi optimum  $13,9^\circ$ , sedangkan Gambar 11 menunjukkan contoh riwayat konvergensi *pressure drop* untuk variasi  $\alpha = 5^\circ$ . Nilai monitor berfluktuasi pada iterasi awal akibat proses konvergensi *nonlinier*, kemudian mendekati nilai stabil sekitar 24,70 Pa, konsisten dengan Tabel 4. Karena simulasi CFD pada studi parametrik ini diformulasikan sebagai *steady state*, sumbu x pada Gambar 11 adalah iterasi *solver*. Fluktuasi pada kurva tersebut merupakan riwayat konvergensi numerik, bukan evolusi fisik terhadap waktu. Dengan klarifikasi ini, Gambar 9 dan Gambar 11 merepresentasikan dua

jenis iterasi yang berbeda: iterasi akuisisi BO pada Gambar 9 dan iterasi *solver* CFD pada Gambar 11.

## KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengevaluasi pengaruh variasi sudut *trailing edge splitter* terhadap performa aerodinamika *silencer* turbin gas melalui pendekatan simulasi CFD dan optimasi *Bayesian*. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan sudut *trailing edge* cenderung menurunkan *Turbulent Kinetic Energy* (TKE), namun sedikit meningkatkan *pressure drop* (PD), sehingga menciptakan *trade-off* desain. Dengan menerapkan algoritma *Bayesian Optimization* berbasis *Gaussian Process*, diperoleh konfigurasi optimal pada sudut 13,9°, yang memberikan kombinasi TKE dan PD paling seimbang dibandingkan desain awal. Evaluasi CFD pada desain hasil optimasi menunjukkan peningkatan performa relatif terhadap *baseline*, menegaskan efektivitas metode optimasi ini dalam konteks desain perangkat *turbomachinery*.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Energy Institute, "Statistical Review of World Energy," 2023.
- [2] J. Winters, "Energy Blog: Gas Power Plants Are Efficiency Giants," diakses 16 Juni 2026, <https://www.asme.org/topics-resources/content/blog-gas-power-plants-are-efficiency-giants#:~:text=Join%20Today>
- [3] P. Hitchin, "High-efficiency, low-emissions coal plants: come HELE or high water," diakses 16 Oktober 2025, <https://www.gevernova.com/gas-power/resources/articles/2018/come-hele-or-high-water>
- [4] M.-L. Niggemeier and Dr. P. Roth, "How Gas Engine Power Plants Can Close The Gap," no. Rolls-Royce, 2024.
- [5] B. Chmielewski, I. Herrero-Durá, and P. Nieradka, "Pressure Loss in Ducts by Dissipative Splitter Silencers: Comparative Study of Standardized, Numerical and Experimental Results," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 22, Article 10998, 2021, doi: 10.3390/app112210998.
- [6] M. R. Jokandan, A. S. Variani, and S. Ahmadi, "Study of Acoustic and Aerodynamic Performance of Reactive Silencer with Different Configurations: Theoretical, Modeling and Experimental," *Heliyon*, vol. 9, no. 9, Article e20058, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e20058.
- [7] C. Sieverding and M. Manna, "A Review on Turbine Trailing Edge Flow," *International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power*, vol. 5, no. 2, Article 10, 2020, doi: 10.3390/ijtp5020010.
- [8] M. I. Hassan, A. D. Andan, W. Asrar, and M. A. M. Sapardi, "Large Eddy Simulation of Low Reynolds Number Flow Around a NACA0015 Airfoil with Modified Trailing Edges," *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, vol. 112, no. 1, pp. 57–79, 2023, doi: 10.37934/aram.112.1.5779.
- [9] X. Liu, H. K. Jawahar, and M. Azarpeyvand, "Wake development of airfoils with serrated trailing edges," *Proceeding of 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Lyon, France, 2016, doi: 10.2514/6.2016-2817.
- [10] Z. Zheng and L. Chen, "Aerodynamic Performance and Wake Development of NACA 0018 Airfoil with Serrated Gurney Flaps," *Frontiers in Energy Research*, vol. 12, Article 1363402, 2024, doi: 10.3389/fenrg.2024.1363402.
- [11] B. Faqihi and F. A. Ghaith, "Computational Analysis of Heat Recovery from Simple Cycle Gas Turbine Exhaust Stacks Through the Silencer Semi-Circular Sections," *Proceeding of ASME 2023 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, New Orleans, USA, 2023, doi: 10.1115/IMECE2023-112921.
- [12] L. Cristea and M. Deaconu, "Evaluation of Noise-Reduction Techniques for Gas-Turbine Test Stands: A Preliminary Analysis," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 13, Article 5702, 2024, doi: 10.3390/app14135702.
- [13] K. Tanriver, "CFD Simulation Analysis of a Diesel Generator Exhaust Muffler and Performance-Based Optimization," *Processes*, vol. 13, no. 3, Article 887, 2025, doi: 10.3390/pr13030887.

- [14] J. M. Reumschüssel, J. G. R. von Saldern, B. Ćosić, and C. O. Paschereit, “Data-Driven Optimization of A Gas Turbine Combustor: A Bayesian Approach Addressing NO<sub>x</sub> Emissions, Lean Extinction Limits, and Thermoacoustic Stability,” *Data-Centric Engineering*, vol. 5, pp. e32-1–e32-24, 2024, doi: 10.1017/dce.2024.29.
- [15] Y. Morita, S. Rezaeiravesh, N. Tabatabaei, R. Vinuesa, K. Fukagata, and P. Schlatter, “Applying Bayesian optimization with Gaussian process regression to Computational Fluid Dynamics Problems,” *Journal of Computational Physics*, vol. 449, Article 110788, 2022, doi: 10.1016/j.jcp.2021.110788.
- [16] F. Plua, V. Hidalgo, P. A. López-Jiménez, and M. Pérez-Sánchez, “Analysis of Applicability of CFD Numerical Studies Applied to Problem When Pump Working as Turbine,” *Water (Basel)*, vol. 13, no. 15, Article 2134, 2021, doi: 10.3390/w13152134.
- [17] C. Bian, S. Zhang, J. Yang, H. Liu, F. Zhao, and X. Wang, “Bayesian Optimization Design of Inlet Volute for Supercritical Carbon Dioxide Radial-Flow Turbine,” *Machines*, vol. 9, no. 10, Article 218, 2021, doi: 10.3390/machines9100218.
- [18] Y. Deng, J. Xu, Y. Li, Y. Zhang, and C. Kuang, “Experimental and Computational Fluid Dynamics Study of the Flow Field of a Model Pump Turbine,” *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, Article 911874, 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.911874.
- [19] S. Zhang, Q. Yang, R. Wang, and X. Wang, “Multi-Objective Bayesian Optimization Design of Elliptical Double Serpentine Nozzle,” *Aerospace*, vol. 11, no. 1, Article 48, 2023, doi: 10.3390/aerospace11010048.
- [20] C. E. Rasmussen and C. K. I. Williams, *Gaussian Processes for Machine Learning*. Cambridge, MA: MIT Press, 2006.
- [21] D. R. Jones, M. Schonlau, and W. J. Welch, “Efficient Global Optimization of Expensive Black-Box Functions,” *Journal of Global Optimization*, vol. 13, no. 4, pp. 455–492, 1998, doi: 10.1023/A:1008306431147.