

## Efektifitas Strategi Pengendalian *Wake-effect* dalam Memaksimalkan Produksi Daya Ladang Turbin Angin

Kurniawan<sup>1\*</sup>, Hasanudin<sup>2</sup>, Agus Dwiyanto<sup>2</sup>, Rivanda Tyaksa Putra<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Prodi S1 Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

<sup>2</sup>Prodi S1 Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

Korespondensi : [kurniawan@itny.ac.id](mailto:kurniawan@itny.ac.id)

### ABSTRAK

*Wake-effect* merupakan fenomena interaksi aerodinamis antar turbin pada ladang turbin angin ketika aliran angin terhalang oleh turbin lain di depannya, yang mengakibatkan kehilangan daya total sebesar 10-25%. *Wake-effect* dapat dikendalikan dengan cara pengaturan sudut *yaw-offset*, sudut *pitch*, *tip-speed-ratio*, ataupun kombinasi. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan sekaligus menentukan strategi pengendalian yang paling efektif dalam memaksimalkan produksi daya total ladang turbin angin. Metode yang digunakan melibatkan analisis dan simulasi dari beberapa strategi pengendalian tersebut dalam mengurangi dampak *wake-effect*. Penelitian ini menggunakan model *wake-effect Gaussian* untuk memodelkan pola aliran angin, interaksi antar turbin, dan daya total ladang turbin angin. Data dihasilkan dari simulasi di beberapa skenario kecepatan angin 3 m/s dan 10 m/s, serta jarak antar turbin 7D dan 12D. Hasil menunjukkan bahwa produksi daya total ladang turbin angin meningkat sebesar 11.41%, 2.21%, 0.00%, dan 12.70% untuk pengaturan sudut *yaw-offset*, sudut *pitch*, *tip-speed-ratio*, dan kombinasi dari ketiganya, secara berturut-turut. Studi ini mengidentifikasi bahwa pengaturan kombinasi dari ketiga parameter merupakan strategi yang paling efektif dalam mengurangi dampak *wake-effect*. Strategi pengendalian *wake-effect* yang tepat dapat secara signifikan meningkatkan produksi daya total ladang turbin angin, dengan potensi penerapan lebih luas pada ladang turbin angin komersial di masa depan.

**Kata kunci:** *Wake-effect*, *Yaw-offset*, *pitch*, *Tip-speed-ratio*, Ladang turbin angin

### ABSTRACT

The *wake effect* is an aerodynamic interaction between turbines in a wind farm, where wind flow is blocked by turbines ahead, leading to a total power loss of 10-25%. The *wake effect* can be controlled by adjusting the *yaw-offset* angle, *pitch* angle, *tip-speed ratio*, or a combination of these strategies. This research aims to compare and determine the most effective control strategy to maximize total wind farm power production. The method involves analyzing and simulating various control strategies to reduce the *wake effect*. A Gaussian *wake-effect* model is used to simulate wind flow patterns, turbine interactions, and total wind farm power. Data is generated from simulations under wind speeds of 3 m/s and 10 m/s, and turbine spacing of 7D and 12D. Results show that total wind farm power production increased by 11.41%, 2.21%, 0.00%, and 12.70% for *yaw-offset* angle, *pitch* angle, *tip-speed ratio*, and a combination of the three, respectively. The study identifies the combination of these parameters as the most effective strategy for reducing the *wake effect*. Proper *wake-effect* control can significantly boost total wind farm power production, with broader potential applications for commercial wind farms in the future.

**Keyword:** *Wake-effect*, *Yaw-offset*, *pitch*, *Tip-speed-ratio*, Wind Turbine Farm

### PENDAHULUAN

Pembangkit listrik tenaga angin akan lebih menguntungkan jika dibangun dalam bentuk ladang turbin angin yang terdiri dari sekumpulan turbin angin [1], [2]. Namun, pengoperasian masing-masing turbin pada ladang turbin angin tidak dapat serta-merta dioperasikan seperti halnya turbin individual yang selalu memaksimalkan daya setiap turbin tanpa mempertimbangkan turbin-turbin lain disekitarnya. Pada ladang turbin angin terjadi *wake-effect* yang merupakan fenomena interaksi aerodinamis antar turbin [3], yang menyebabkan kehilangan daya total sebesar 10%-25% dari daya nominalnya [4]. Kehilangan daya total ladang turbin angin terjadi akibat menurunnya kecepatan angin yang diterima oleh turbin angin setelah melewati rotor turbin angin di depannya [5], [6], [7]. Tata letak ladang turbin angin yang optimal dengan jarak antar turbin yang cukup jauh mungkin merupakan mitigasi yang dapat direncanakan secara on-design untuk menghindari dampak *wake-effect* [8]. Namun, keterbatasan area menyebabkan hal tersebut sulit untuk dicapai [1], [9]. Di sisi lain, dampak *wake-effect* dapat diminimalkan secara on-operation yaitu mitigasi

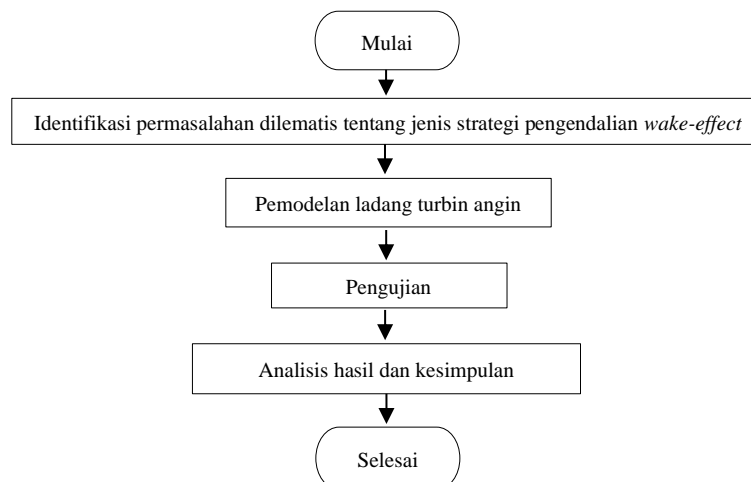
selama ladang turbin angin sedang dioperasikan, menggunakan beberapa strategi pengendalian *wake-effect*, di antaranya pengaturan sudut *yaw-offset*, sudut *pitch*, *tip-speed-ratio* (TSR), ataupun kombinasi, di mana pengoptimalan tersebut dilakukan untuk memvariasikan faktor induksi aksial pada masing-masing turbin [10].

Beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan dengan analisis perbandingan efektivitas strategi pengendalian *wake-effect* telah dilakukan, di antaranya adalah Guilem dkk yang menyelidiki perbandingan efektivitas pengendalian *wake-effect* berbasis pengaturan TSR dan sudut tilt pada ladang turbin angin yang terdiri dari 1×2 turbin sejajar untuk memaksimalkan produksi daya total. Dalam studinya, mereka mengatur TSR turbin hulu agar memberi kecepatan aliran angin yang cukup untuk turbin hilir. Selain itu, pengaturan sudut tilt yang menyerupai pengaturan sudut *yaw-offset* pada turbin hulu dilakukan untuk mengarahkan *wake-effect* agar menjauhi turbin hilir. Dalam penelitiannya, mereka menyimpulkan bahwa pengendalian *wake-effect* berbasis pengaturan sudut tilt atau *yaw-offset* jauh lebih efektif yang menghasilkan peningkatan produksi daya total sebesar 16.5% daripada pengaturan TSR yang hanya menghasilkan peningkatan produksi daya total kurang dari 0.5%. Reza dkk menguji ladang turbin angin yang terdiri dari 3×3 turbin sejajar. Dalam studinya, pengendalian *wake-effect* berbasis pengaturan TSR dan sudut *pitch* diterapkan pada 3 wilayah kurva daya berdasarkan kecepatan angin (kecepatan angin cut-in, terukur, dan cut-out). Mereka mengungkapkan bahwa pengaturan TSR lebih efektif pada wilayah antara kecepatan angin cut-in dan terukur, sedangkan pengaturan sudut *pitch* lebih tepat pada wilayah antara kecepatan angin terukur dan cut-out dalam upaya memaksimalkan produksi daya total ladang turbin angin. Peningkatan produksi daya total ladang turbin angin sebesar 13.9% yang didominasi oleh pengaturan TSR. Zhao dkk melakukan analisis perbandingan strategi pengendalian *wake-effect* berbasis pengaturan sudut *yaw-offset* dan kombinasi (sudut *yaw-offset* dan sudut *pitch*) pada ladang turbin angin yang terdiri dari 1×3 turbin sejajar untuk memaksimalkan produksi daya total ladang turbin angin sekaligus meminimalkan beban kelelahan masing-masing rotor turbin akibat pengaturan sudut *yaw-offset*. Dalam studinya, mereka mengungkapkan bahwa kombinasi pengaturan sudut *yaw-offset* dan sudut *pitch* 2.8% lebih efektif daripada jika hanya menggunakan pengaturan sudut *yaw-offset*.

Pada penelitian ini, pada dasarnya mempunyai konsep yang hampir sama dengan beberapa penelitian terdahulu dalam membandingkan dan menentukan strategi pengendalian *wake-effect* yang paling efektif dalam upaya memaksimalkan produksi daya total ladang angin. Perbedaan mendasar pada penelitian ini adalah bahwa selain mempertimbangkan metode pengendalian *wake-effect* dari sudut pandang peningkatan produksi daya total ladang turbin angin, juga menawarkan pertimbangan tingkat kemudahan algoritma kontrol ataupun algoritma optimasi dalam mewujudkan tercapainya pengendalian tersebut dalam proses pengoperasian melalui analisis kurva daya ladang turbin angin. Karena telah kita ketahui bersama, bahwa dalam skala utilitas ladang turbin angin terdiri dari banyak turbin dan memiliki banyak parameter yang harus dikendalikan atau dioptimalkan secara bersamaan. Selain itu, ladang turbin angin memiliki lingkungan yang dinamis seperti perubahan kecepatan aliran angin, intensitas turbulensi atmosfer, sudut aliran angin, dan pemisahan antara turbin, yang semuanya sangat memengaruhi perilaku interaksi bangun [11], [12].

## METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini dimulai dari identifikasi permasalahan, pemodelan ladang turbin angin, pengujian, analisis hasil, dan kesimpulan, seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Flow-chart metode penelitian

### Identifikasi Masalah

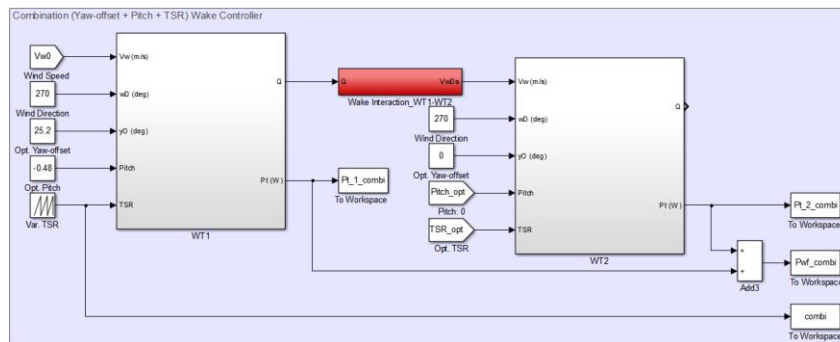
Berdasarkan studi [10], identifikasi masalah dilematis beberapa strategi pengendalian *wake-effect*, dirangkum pada Tabel 1 berikut.

**Tabel 1.** Identifikasi permasalahan dilematis strategi pengendalian *wake-effect*

Strategi	Kebijakan	Kekurangan
Pengaturan sudut <i>yaw-offset</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tersedianya model analitis untuk memprediksi defleksi <i>wake-effect</i>.</li> <li>- Mampu meningkatkan produksi daya total, bahkan dalam kasus hanya 2 turbin sejajar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Berdampak buruk pada beban struktural turbin.</li> </ul>
Pengaturan sudut <i>pitch</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pemulihan <i>wake-effect</i> yang lebih cepat.</li> <li>- Mampu meningkatkan produksi daya total 2 turbin sejajar pada jarak aksial yang jauh dan pada kecepatan angin rendah.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Menyebabkan lonjakan yang lebih signifikan pada beban struktural dibandingkan dengan pengaturan sudut <i>yaw-offset</i>.</li> </ul>
Pengaturan TSR	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kinerja yang lebih baik jika dikombinasikan dengan strategi pengendalian lain.</li> <li>- Tidak menyebabkan peningkatan beban struktural yang signifikan.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hanya mampu meningkatkan produksi daya total pada jumlah turbin yang banyak.</li> </ul>

**Pemodelan Ladang Turbin Angin**

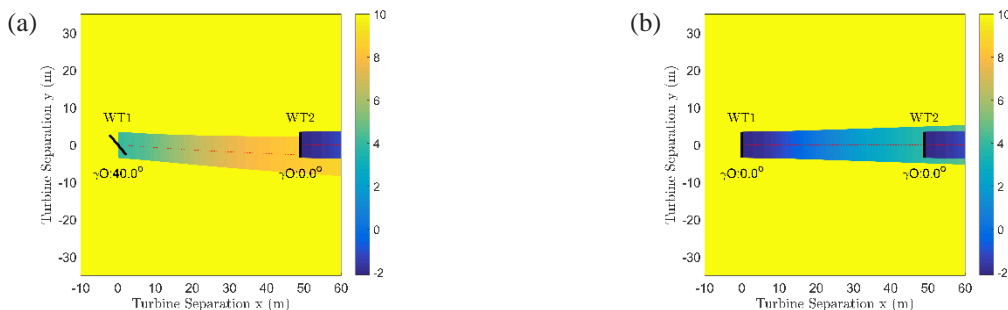
Model ladang turbin angin di bawah kondisi *wake-effect* berbasis Gaussian yang telah diusulkan oleh Shapiro [13] terdiri dari 1x2 turbin sejajar digunakan untuk mensimulasikan pola aliran angin, interaksi antar turbin, dan mengevaluasi produksi daya total dengan pengendalian *wake-effect* ditunjukkan pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Pemodelan ladang turbin angin

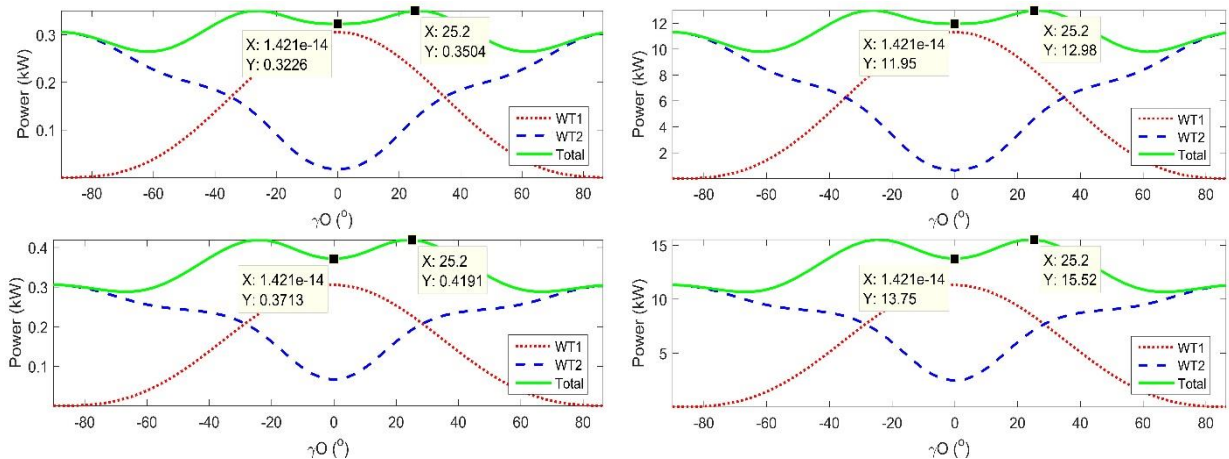
**Pengujian Model Ladang Turbin Angin**

Pengujian 4 strategi pengendalian *wake-effect* dilakukan dengan pendekatan prosedur seperti yang dilakukan pada penelitian sebelumnya, yaitu pada skenario kecepatan angin yang berbeda [14] dan jarak antar turbin yang berbeda [15]. Pola aliran angin dan interaksi antar turbin pada konfigurasi tata letak ladang turbin angin 1x2 ditunjukkan pada Gambar 3.



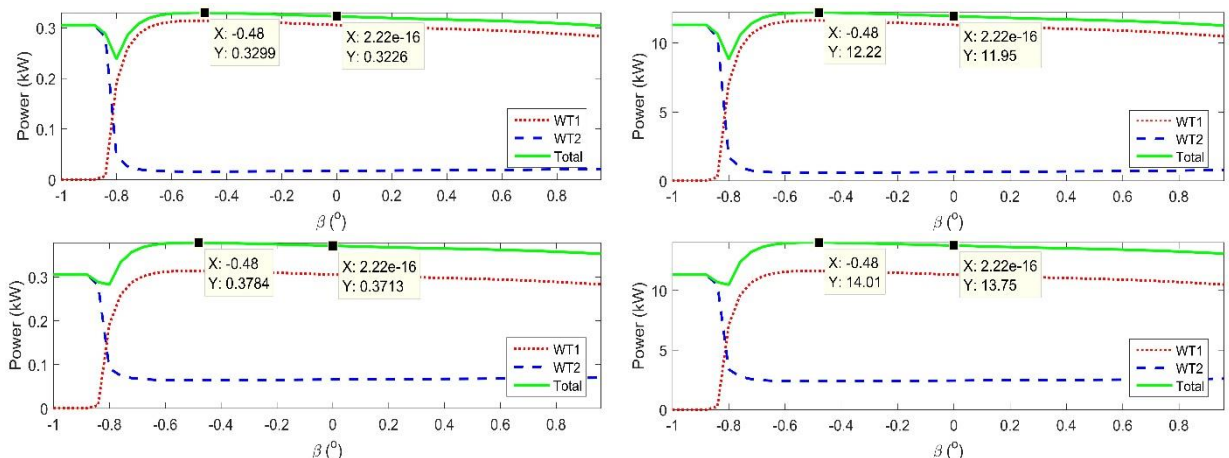
**Gambar 3.** Pola aliran angin dan interaksi antar turbin,  
 (a). Pengaturan sudut *yaw-offset*,  
 (b). Pengaturan sudut *pitch* atau TSR

Pengujian pengendalian *wake-effect* berbasis pengaturan sudut *yaw-offset* di bawah kondisi kecepatan angin 3 m/s dan 10 m/s dengan jarak antar turbin 7D dan 12D, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



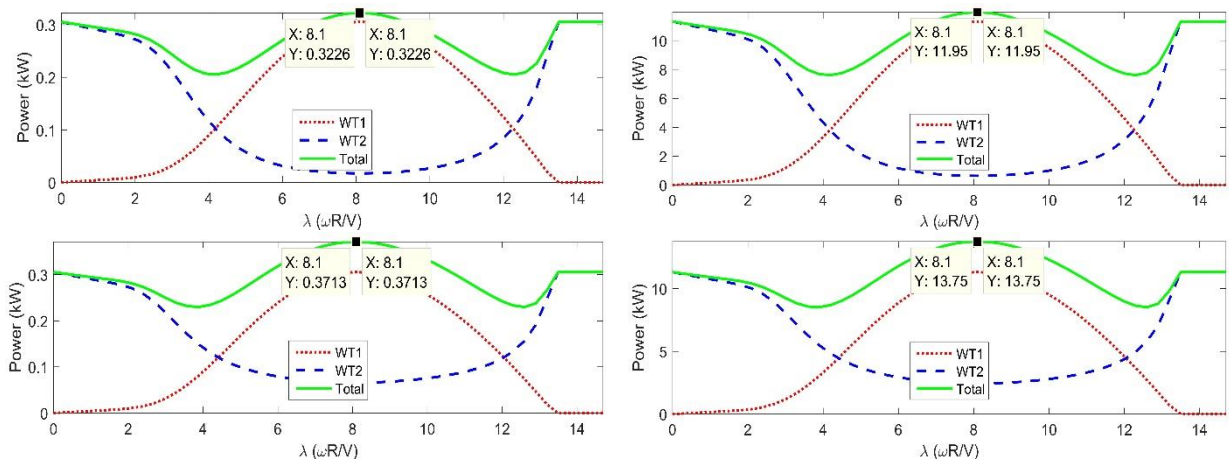
**Gambar 4.** Kurva daya ladang turbin angin dengan strategi pengaturan sudut *yaw-offset*

Pengujian strategi pengendalian *wake-effect* berbasis sudut *pitch* juga dilakukan dengan skenario yang sama untuk mengakomodasi kekurangan yang dimiliki pengaturan sudut *pitch*, di mana efektifitasnya mempunyai ketergantungan pada jarak antar turbin yang cukup jauh dengan kecepatan angin yang rendah, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



**Gambar 5.** Kurva daya ladang turbin angin dengan strategi pengaturan sudut *pitch*

Pengujian strategi pengendalian *wake-effect* berbasis TSR dilakukan untuk mengetahui kinerja di bawah kondisi yang mengarah pada kekurangan yang dimilikinya, yaitu tidak efektif pada ladang turbin angin yang hanya terdapat 2 turbin sejajar, ditunjukkan pada Gambar 6.

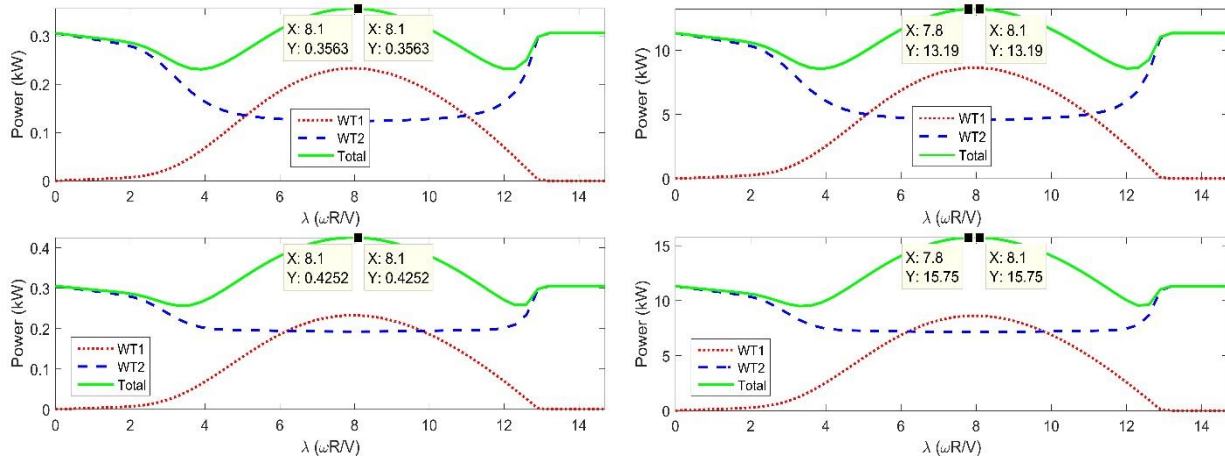


**Gambar 6.** Kurva daya ladang turbin angin dengan strategi pengaturan TSR





Terakhir adalah pengujian strategi pengendalian *wake-effect* kombinasi yang dilakukan untuk mengakomodasi kelebihan yang dimiliki pengaturan TSR, seperti ditunjukkan pada Gambar 7.



**Gambar 7.** Kurva daya ladang turbin angin dengan strategi pengaturan kombinasi (sudut *yaw-offset*, sudut *pitch*, dan TSR)

## HASIL DAN ANALISIS

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, perbandingan efektifitas dari masing-masing strategi pengendalian *wake-effect* dianalisis berdasarkan kemampuannya dalam memaksimalkan produksi daya total ladang turbin angin di bawah kondisi *wake-effect*, kecepatan angin, dan jarak antar turbin yang berbeda ketika pengaturan parameter turbin hulu berada pada titik optimal yang menghasilkan produksi daya total tertingginya. Harapannya adalah bahwa daya yang dihasilkan turbin hilir lebih besar daripada kerugian daya turbin hulu akibat manipulasi parameter tambahan pada turbin hulu yang beroperasi pada kondisi yang tidak optimal.

Berdasarkan hasil pengujian pada pengaturan sudut *yaw-offset* pada Gambar 3, dapat diamati bahwa peningkatan produksi daya total ladang turbin angin tidak sensitif terhadap kecepatan angin, namun lebih sensitif terhadap jarak antar turbin, yaitu sebesar 11.41% pada jarak antar turbin yang lebih jauh. Sama seperti pengaturan sudut *yaw-offset*, pengaturan sudut *pitch* juga sensitif terhadap jarak antar turbin, namun peningkatan produksi daya total lebih rendah jika dibandingkan dengan pengaturan sudut *yaw-offset* dan peningkatan daya total tertinggi sebesar 2.21% pada jarak antar turbin yang lebih dekat. Seperti yang diungkapkan [10], strategi pengendalian *wake-effect* berbasis pengaturan TSR tidak efektif pada ladang turbin angin dengan jumlah turbin yang sedikit, tidak peduli seberapa besar kecepatan angin dan seberapa jauh jarak antar turbin. Hal tersebut dapat dibuktikan pada pengujian pengaturan kombinasi (sudut *yaw-offset*, sudut *pitch*, dan TSR), peningkatan produksi daya total tertinggi terjadi ketika TSR diatur pada nilai optimal, baik pada turbin hulu maupun turbin hilir. Namun, pengaturan kombinasi menghasilkan produksi daya total tertinggi dibandingkan pengaturan yang lainnya, bahkan 1.46% lebih tinggi dibandingkan dengan pengaturan sudut *yaw-offset*.

Selain efektifitas dari sudut pandang peningkatan produksi daya total, strategi pengendalian *wake-effect* di atas juga perlu dianalisis dengan sudut pandang yang lain, yaitu pertimbangan tingkat kemudahan algoritma kontrol ataupun algoritma optimasi dalam mencapai nilai tersebut melalui analisis *landscape* kurva daya total ladang turbin angin. Kurva daya total pada pengaturan sudut *yaw-offset* dan sudut *pitch* mempunyai *landscape* dengan 2 buah bukit, di mana ketidak-simetris-an sistem *yaw* akan membuat 2 bukit tersebut mempunyai nilai yang berbeda, sehingga algoritma optimasi mempunyai kemungkinan terjebak pada optima-lokal. Kurva daya total pada pengaturan TSR dan pengaturan kombinasi yang mempunyai kinerja yang lebih menjanjikan mempunyai *landscape* yang lebih rumit dan lebih menantang, yaitu terdiri dari 3 buah bukit, di mana algoritma optimasi mempunyai kemungkinan yang lebih besar terjebak pada 2 bukit sub-optimal.

## HASIL DAN ANALISIS

Di antara 4 strategi pengendalian *wake-effect* yang dibandingkan, dapat disimpulkan bahwa pengaturan kombinasi (sudut *yaw-offset*, sudut *pitch*, dan TSR) mempunyai kinerja yang paling efektif. Namun untuk mencapainya diperlukan algoritma optimasi yang canggih, karena *landscape* kurva daya total yang paling rumit dengan parameter optimasi yang lebih banyak dibandingkan strategi pengendalian *wake-effect* lainnya, dan itulah

harga yang harus dibayar untuk mendapatkan hasil peningkatan produksi daya total ladang turbin angin yang memuaskan.

### UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada ITNY yang telah memberikan izin akses Laboratorium Pengaturan dan Laboratorium Aerodinamika. Ucapan terimakasih juga diucapkan kepada kedua orang tua, rekan-rekan peneliti, dan pihak terkait yang telah membantu terlaksananya penelitian ini.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. K. Balakrishnan dan S. Hur, "Maximization of the Power Production of an Offshore Wind Farm," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 8, p. 4013, 2022. doi: 10.3390/app12084013
- [2] D. Hendrawati, A. Soeprijanto, dan M. Ashari, "Turbine Wind Placement with Staggered Layout as a Strategy to Maximize Annual Energy Production in Onshore Wind Farms," *International Journal of Energy Economics and Policy (IJEPP)*, vol. 9, no. 2, pp. 334-340, 2019. doi: 10.32479/ijeep.7437
- [3] B. P. Rak dan R. B. S. Pereira, "Impact of the Wake Deficit Model on Wind Farm Yield: A Study of Yaw-Based Control Optimization," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 220, p. 104827, 2022. doi: 10.1016/j.jweia.2021.104827
- [4] S. Yang, X. Deng, Z. Ti, B. Yan, dan Q. Yang, "Cooperative Yaw Control of Wind Farm Using a Double-Layer Machine Learning Framework," *Renewable Energy*, vol. 193, pp. 519-537, 2022. doi: 10.1016/j.renene.2022.04.104
- [5] C. L. Archer, *et al.*, "Review and Evaluation of Wake Loss Models for Wind Energy Applications," *Applied Energy*, vol. 226, pp. 1187-1207, 2018. doi:10.1016/j.apenergy.2018.05.085
- [6] V. R. Padullaparathi, S. Nagarathinam, A. Vasan, V. Menon, dan D. Sudarsanam, "FALCON- FARM Level CONTROL for Wind Turbines Using Multi-Agent Deep Reinforcement Learning," *Renewable Energy*, vol. 181, pp. 445-456, 2022. doi: 10.1016/j.renene.2021.09.023
- [7] J. W. Lin, W. J. Zhu, dan W. Z. Shen, "New Engineering Wake Model for Wind Farm Applications," *Renewable Energy*, vol. 198, pp. 1354-1363, 2022. doi: 10.1016/j.renene.2022.08.116
- [8] J. Kuo, K. Pan, N. Li, dan H. Shen, "Wind Farm Yaw Optimization via Random Search Algorithm," *Energies*, vol. 13, no. 4, p. 865, 2020. doi:10.3390/en13040865
- [9] J. Sun, *et al.*, "Quantitative Evaluation of Yaw-Misalignment and Aerodynamic Wake Induced Fatigue Loads of Offshore Wind Turbines," *Renewable Energy*, vol. 199, pp. 71-86, 2022. doi: 10.1016/j.renene.2022.08.137
- [10] R. Nash, R. Nouri, dan V. B. H. Ahmad, "Wind Turbine Wake Control Strategies: A Review and Concept Proposal," *Energy Conversion and Management*, vol. 245, p. 114581, 2021. doi: 10.1016/j.enconman.2021.114581
- [11] L. Zhao, L. Xue, Z. Li, J. Wang, Z. Yang, dan Y. Xue, "Progress on Offshore Wind Farm Dynamic Wake Management for Energy," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 10, no. 10, p. 1395, 2022. doi: 10.3390/jmse10101395
- [12] S. Kurniawan, A. Triwiyatno, dan I. Setiawan, "Optimization of Wind Farm Yaw Offset Angle using Online Genetic Algorithm with a Modified Elitism Strategy to Maximize Power Production," *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika*, vol. 9, no. 1, pp. 185-199, 2023. doi:10.26555/jiteki.v9i1.25747
- [13] C. R. Shapiro, D. F. Gayme, dan C. Meneveau, "Modelling yawed Wind Turbine Wakes: A Lifting Line Approach," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 841, no. 12, p. R1, 2018. doi:10.1017/jfm.2018.75
- [14] R. Jahantigh, S. M. Esmailifar, dan S. A. Sina, "Wind Farm Control and Power Curve Optimization using Induction-Based Wake Model," *Measurement and Control (United Kingdom)*, vol. 56, no. 9-10, pp. 1751-1763, 2023, doi: 10.1177/00202940231180624
- [15] A. G. Barcos dan F. P. Agel, "Enhancing Wind Farm Performance through Axial Induction and Tilt Control: Insights from Wind Tunnel Experiments," *Energies*, vol. 17, no. 1, pp. 0-20, 2024. doi:10.3390/en17010203