

Analisis Dampak Lingkungan dan Keekonomian Pembangkit Listrik Tenaga *Co-firing* Biomassa dan Batu bara sebagai Upaya Bauran Energi Terbarukan

Dhiyanti Nawang Palupi¹, Sri Sundari², M. Ikhwan Syahtaria³, Leo Sianipar⁴

Fakultas Manajemen Pertahanan, Universitas Pertahanan Republik Indonesia
dhiyantinaawang@gmail.com¹, srisundari65@yahoo.co.id², syahtaria90@gmail.com³,
peterleomedia@gmail.com⁴

ABSTRACT

Steam power plants are the largest contributor to carbon emissions in Indonesia. Utilizing biomass fuel through co-firing technology is one way to reduce carbon dioxide emissions. As part of an effort to increase the use of renewable energy, this study will assess the economic and environmental effects of co-firing biomass and coal power plants. This study uses a descriptive method of analysis of literature studies. The research results show that the continuous use of coal can lead to extinction. According to the data, the energy potential of biomass reaches 32.6 GW, with a new utilization of 1,895.7 MW, or around 5.8%. It takes more than 9 million tons of biomass every year to support the application of co-firing technology in 52 steam power plants in Indonesia. Various sources of biomass have the potential to support the application of co-firing technology. To achieve the target of 23 percent of the new renewable energy mix in 2025, the supply of biomass is very helpful. In addition to being able to increase its contribution to the renewable energy mix, the application of co-firing can also help the growth of the people's economy or circular economy.

Keywords: Coal, Biomass, Co-firing, Economy, Environment

ABSTRAK

Pembangkit listrik tenaga uap merupakan penyumbang emisi karbon terbesar di Indonesia. Memanfaatkan bahan bakar biomassa melalui teknologi *co-firing* adalah salah satu cara untuk mengurangi emisi karbon dioksida. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dan keekonomian pembangkit listrik *co-firing* biomassa dan batu bara sebagai upaya bauran energi terbarukan. Penelitian ini menggunakan metode deskriptif analisis studi literatur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan batu bara terus menerus bisa berujung pada kepunahan. Menurut data, potensi energi biomassa mencapai 32,6 GW, dengan pemanfaatan baru 1.895,7 MW, atau sekitar 5,8%. Dibutuhkan lebih dari 9 juta ton biomassa setiap tahun untuk mendukung penerapan teknologi *co-firing* di 52 pembangkit listrik tenaga uap yang ada di Indonesia. Terdapat beragam sumber biomassa yang berpotensi mendukung penerapan teknologi *co-firing*. Untuk mencapai target 23 persen bauran energi baru terbarukan pada tahun 2025, pasokan biomassa sangat membantu. Selain dapat meningkatkan kontribusi terhadap upaya bauran energi terbarukan, penerapan *co-firing* juga dapat membantu pertumbuhan ekonomi kerakyatan atau ekonomi sirkular.

Kata kunci: *Baru bara, Biomassa, Co-firing, Ekonomi, Lingkungan*

PENDAHULUAN

Perseroan Terbatas Perusahaan Listrik Negara adalah perusahaan milik negara yang berkomitmen untuk menghasilkan listrik yang ramah lingkungan. Salah satu tindakan yang diambil adalah teknologi *co-firing*, yang merupakan proses di mana biomassa ditambahkan ke pembangkit listrik tenaga uap sebagai bahan bakar pengganti parsial atau campuran batu bara. Teknologi *co-firing* diyakini sebagai salah satu inovasi dalam meminimalisir besaran nilai emisi.

Laporan yang dikeluarkan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral menunjukkan bahwa kapasitas pembangkit listrik yang terpasang di Indonesia mencapai 72.750,72 MW, menghasilkan konsumsi listrik nasional sebesar 242,6 TWh pada tahun 2020, sementara pada tahun 2019 sebesar 69.678,85 MW (Aditya *et al.*, 2022). Menurut angka-angka tersebut, pembangkit listrik tenaga uap masih merupakan sumber energi utama di Indonesia. Padahal jika digunakan dalam jangka panjang ketersediaan baru bara akan semakin menipis. Selain itu pembangkit listrik tenaga uap juga dinilai mencemari lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan langkah konkret untuk mengurangi penggunaan baru bara sebagai sumber energi. Ini sejalan dengan studi Merzic *et al.* (2022) yang menerangkan bahwa perlunya mencari solusi transisi yang berkeadilan, baik dalam konteks sosial dan ekonomi serta bermanfaat bagi aspek lingkungan dan penyelamatan iklim.



Gambar 1 Lokasi PLTU Co-firing Komersial

Sumber : Ditjen EBTKE, 2023

Pada bulan Maret 2021, PLN melakukan uji coba *co-firing* di 26 lokasi PLTU dengan bagian biomassa 1-5%. Berdasarkan data 26 diatas, terdapat 13 unit PLTU yang sudah menerapkan implementasi *co-firing* biomassa secara komersial dimana tersebar di wilayah Pulau Jawa, Kalimantan, Sulawesi, dan Lombok. Menurut Rencana Umum Tenaga Listrik Nasional, Perusahaan Listrik Negara bermaksud untuk menerapkan teknologi *co-firing* pada 52 unit pembangkit listrik tenaga uap pada tahun 2024, dengan kapasitas total *co-firing* mencapai 18 GW (Ariyanto & Mustakim, 2023). Teknologi *co-firing* menjadi lebih kompetitif karena dilakukan tanpa

menaikkan biaya. Salah satu program untuk mendukung target bauran energi baru terbarukan nasional adalah *co-firing* biomassa dan baru bara. Manfaat *co-firing* dalam pembangkit listrik tenaga uap adalah dapat mengurangi emisi dan penghematan BPP.

Dalam upaya menjaga kelestarian fungsi lingkungan hidup, mitigasi emisi karbon dioksida adalah upaya untuk mengurangi emisi karbon dioksida (CO₂), terutama yang dihasilkan dari eksplorasi dan eksploitasi sumber energi dari pembangkit listrik tenaga uap (Anggraini *et al.*, 2018). Presiden Indonesia menyatakan komitmennya untuk menurunkan emisi gas rumah kaca sebesar 29% dengan upaya sendiri dan sebesar 41% dengan bantuan internasional pada tahun 2030 dalam pertemuan Conference of the Parties ke-21 di Paris. Dari 29%, penurunan emisi gas rumah kaca sebesar 314 juta ton karbon dioksida merupakan kontribusi sektor energi.

Saat ini, tingkat penggantian bahan bakar ramah lingkungan untuk sistem pembakaran *co-firing* berkisar antara 3 hingga 10%. Semakin banyak campuran bahan bakar alternatif atau ramah lingkungan yang digunakan, semakin sedikit gas rumah kaca yang dihasilkan (Ariyanto & Mustakim, 2023). Biomassa diyakini mengandung belerang yang lebih rendah dibandingkan baru bara. Dengan demikian, pembangkit listrik dari *co-firing* biomassa dan baru bara memiliki potensi untuk mengurangi emisi karbon dioksida, nitrogen oksida, dan SO_x. Berdasarkan uraian ini, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak keekonomian dan lingkungan dari penggunaan *co-firing* biomassa dan baru bara sebagai upaya bauran energi terbarukan.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian adalah cara sistematis untuk mendapatkan pengetahuan ilmiah. Ini digunakan untuk mencapai tujuan penelitian peneliti dengan data yang sudah dikumpulkan (Maghfuri *et al.*, 2022). Pada prinsipnya, metode penelitian adalah pengumpulan data ilmiah untuk tujuan dan kepentingan tertentu. Tujuan penelitian memiliki tingkatan berdasarkan level peneliti, yaitu menggambarkan, membuktikan teori yang sudah ada, membuktikan teori yang baru, mengembangkan, menemukan, serta menciptakan sesuatu (Sugiyono, 2018).

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif analisis literatur, yang dikenal sebagai analisis literatur *review*. Analisis literatur *review* adalah metode sistematis, eksplisit, dan reproduisibel yang digunakan untuk menemukan, mengevaluasi, dan menyusun temuan penelitian dan teori para peneliti sebelumnya. Tujuan dari pemeriksaan literatur adalah untuk menganalisis dan menggabungkan pengetahuan yang sudah ada tentang subjek yang akan diteliti untuk menemukan ruang kosong untuk penelitian yang akan dilakukan. Dalam artikel ini, peneliti menggunakan metode pengumpulan data studi pustaka deskriptif untuk mendapatkan informasi tentang subjek penelitian. Jenis studi pustaka ini termasuk buku, jurnal, penelitian yang dilakukan oleh lembaga pemerintah dan non-pemerintah, berita *online*, dan dokumen *online* lainnya yang berkaitan dengan subjek penelitian (Arba *et al.*, 2022).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dampak *Co-firing* Terhadap Lingkungan

Selama dua dekade terakhir, sektor energi bertanggung jawab atas 32% emisi karbon Indonesia, dengan pembangkit listrik tenaga uap baru bara sebagai penyumbang terbesar. Oleh karena itu, kebijakan yang tepat harus diterapkan untuk pembangkit listrik tenaga uap baru bara. Sangat bergantung pada bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama menjadi penyebab utama emisi karbon dioksida yang tidak terbatas. Bahan bakar fosil memenuhi sekitar 80% dari total kebutuhan energi dunia dengan peningkatan emisi karbon dioksida global sebesar 2,5% per tahun selama beberapa dekade terakhir (Zaman & Ghosh, 2022).

Meskipun Indonesia adalah salah satu negara yang menandatangani *Kyoto Protocol*, keadaan daur hidup kelistrikan negara tersebut sangat bertentangan dengan tujuan nasional dan internasional. Fakta bahwa bahan bakar fosil terus menjadi sumber energi listrik utama di Indonesia belum terpatahkan. Penerbitan Kebijakan Energi Nasional adalah salah satu upaya untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil dalam pembangkit listrik. Ada banyak kebijakan dan regulasi yang dibuat untuk mendukung Kebijakan Energi Nasional untuk mencapai 23% penggunaan energi baru dan terbarukan pada tahun 2025. Salah satunya adalah pengembangan pembangkit listrik tenaga *co-firing* biomassa dan baru bara di Indonesia.

Penggunaan baru bara terus menerus bisa berujung pada kepunahan. Oleh karena itu, menyubstitusi baru bara dan biomassa adalah salah satu solusi yang dapat dilakukan untuk mengurangi penggunaan baru bara. Salah satu sumber energi terbarukan yang sangat prospektif adalah biomassa. Menurut data, potensi energi biomassa mencapai 32,6 GW, dengan pemanfaatan baru 1.895,7 MW, atau sekitar 5,8%. Teknik *co-firing* menggabungkan biomassa dan baru bara sebagai bahan bakar pada rasio tertentu sambil mempertahankan efisiensi dan kualitas pembangkit listrik. Teknologi *co-firing* sudah diterapkan di beberapa negara, terutama negara yang menetapkan kebijakan pemanfaatan energi baru terbarukan secara optimal (Rizqi *et al.*, 2022). Teknologi *co-firing* juga dapat membantu kebijakan dalam rangka menurunkan emisi gas rumah kaca dan mengurangi penggunaan energi fosil.

Kesepakatan hijau Eropa menetapkan tujuan yang jelas untuk transformasi ekonomi menjadi lebih bersih dan sehat. Sektor energi dan khususnya sektor ketenagalistrikan menghadapi tantangan serius untuk mencapai tujuan yang ditetapkan oleh kebijakan. Penuaan pembangkit listrik dan infrastruktur jaringan menghentikan secara bertahap produksi energi berbasis fosil (Aszodi *et al.*, 2021). Sebagai bagian dari *Roadmap* Konservasi Energi, Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional 2019-2038 mencantumkan inisiatif *co-firing* dalam hal penyediaan energi pembangkit listrik. Untuk mewujudkannya, *test* ini dilakukan oleh PT. PLN pada

pembangkit listrik tenaga uap. Pemerintah tengah merencanakan untuk mengurangi emisi pembangkit listrik dengan menghentikan pengoperasian pembangkit listrik tenaga uap baru bara sebesar 53 GW dari tahun 2025 hingga 2045. Dibutuhkan lebih dari 9 juta ton biomassa setiap tahun untuk mendukung penerapan teknologi *co-firing* di 52 pembangkit listrik tenaga uap yang ada di Indonesia. Terdapat beragam sumber biomassa yang berpotensi mendukung penerapan teknologi *co-firing*. Untuk mencapai target 23 persen bauran energi baru terbarukan pada tahun 2025, pasokan biomassa sangat membantu.

Meskipun teknologi *co-firing* diterapkan guna membantu menurunkan emisi gas rumah kaca, metode ini juga berpotensi memperpanjang masa operasi pembangkit listrik tenaga uap karena dalam pengoperasiannya tetap menggunakan baru bara. Sehingga metode ini tidak layak dipilih sebagai solusi transisi energi jangka panjang karena secara prosesnya masih tetap membakar baru bara meskipun sudah dicampur dengan biomassa. Metode *co-firing* hanya bisa digunakan jangka pendek untuk memenuhi bauran energi pada tahun 2025.

Biaya Ekonomi Metode *Co-Firing*

Metode *co-firing* digunakan untuk menggantikan biomassa dan baru bara sebagai bahan bakar dalam rasio tertentu. Namun, metode ini tetap mempertimbangkan efisiensi dan kualitas pembangkit listrik (Zhou *et al.*, 2019). Adapun jenis biomassa hingga perbandingan nilai kalor dengan biomassa lain dapat dilihat pada tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Perbandingan Nilai Kalor Antara Jenis Biomassa

Jenis Biomassa	Nilai Kalor (Kkal/kg)	Moisture Content (%)
Serat sawit (fiber)	3340	30
Cangkang sawit (shell)	4300	15
Tandan kosong (EFB)	1200	45
Pelepah sawit (frond)	3350	20
Batang re-planting sawit (<i>trunk</i>)	3500	20
Ampas tebu (bagasse)	1850	50
Daun dan pucuk tebu	3000	30
Sabut kelapa	3300	30
Tempurung kelapa	4300	15
Batang <i>re-planting</i> karet	4400	15
Sekam padi (<i>rice husk</i>)	3350	12
Jerami padi	2800	50
Tongkol jagung (corn cob)	3500	14
Tongkol jagung (corn cob)	3227	20
Batang dan daun jagung	2500	40
	4400	15
	2200	20

Limbah kayu industri (<i>wood waste</i>)	4100	16
Sampah kota (RDF dari MSW)	4600	15
Bambu	5300	5
Kaliandra merah		
Wood pellet		

Sumber: Rizqi, 2022

Berdasarkan penelitian Mujiono dan Akbar (2023) yang menerangkan bahwa pengaplikasian *co-firing* dengan rasio tinggi membutuhkan biaya potensial yang secara inheren spesifik per lokasi. Total investasi modal yang dibutuhkan bergantung pada jenis dan rasio biomassa, metode *co-firing* yang telah direncanakan serta kondisi PLTU tertentu. Selain dapat meningkatkan kontribusi terhadap upaya bauran energi terbarukan, penerapan *co-firing* juga dapat membantu pertumbuhan ekonomi kerakyatan atau ekonomi sirkular (*circular economy*). Dengan menerapkan metode ini di Indonesia, dapat diciptakan lapangan kerja baru dan peluang bisnis dalam industri biomassa, terutama industri yang bergantung pada sampah dan limbah.

Biomassa yang dapat digunakan dalam metode *co-firing* dapat diperoleh dari limbah pertanian, limbah industri pengolahan kayu, limbah rumah tangga, dan tanaman energi yang ditanam di lahan kering atau dibudidayakan di Kawasan Hutan Tanaman Energi, seperti pohon Lamtoro, Gamal, dan Kaliandra. Kendati demikian, tentu saja terdapat beberapa tantangan dalam penggunaan *co-firing* biomassa. Salah satunya adalah menjaga ketersediaan bahan baku biomassa secara berkelanjutan dengan mempertimbangkan aspek ekonomi. Diharapkan biaya listrik yang diperoleh tidak melebihi biaya pokok penyediaan (BPP) yang telah ditetapkan dan tetap terjangkau. Diharapkan PLN menemukan peluang pemanfaatan biomassa, berkomitmen dengan pemasok biomassa besar seperti Perhutani, dan mendorong pertumbuhan pasar biomassa skala kecil dan menengah. Apabila upaya ini terus dilakukan di setiap titik PLTU di Indonesia, maka akan menghasilkan pasar yang lebih besar untuk permintaan (*demand*) dan pasokan (*supply*), serta peningkatan *economics of scale*.

Karena Indonesia memiliki banyak sumber daya alam, jenis biomassa di atas dapat dengan mudah ditemukan dan tersedia secara luas. Selain itu, tidak memerlukan biaya yang sangat tinggi. Dampak ekonomi dari pemanfaatan biomassa sangat signifikan. Saat ini, ketersediaan biomassa di Indonesia merupakan masalah penting dalam perencanaan energi strategis jangka panjang. Sementara itu berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan Erlangga *et al.* (2023) yang menggunakan pelet efb dan cangkang sawit dalam metode *co-firing* menunjukkan bahwa menggunakan metode HPT sesuai Perdir PLN 001/DIR/2020 dapat menghemat biaya produksi listrik sebesar 574,91 Rp/kWh (untuk 5% efb) dan 379,61 Rp/kWh (untuk 25% cangkang sawit).

Metode *co-firing* menggunakan biomassa sebagai alternatif untuk mengurangi penggunaan baru bara untuk memenuhi sebagian besar kebutuhan energi nasional.

Pemerintah Indonesia memperhatikan biomassa sebagai sumber energi alternatif dan solusi jangka panjang untuk menghadapi kelangkaan energi. Akan tetapi, terdapat beberapa tantangan yang mungkin dihadapi, seperti peningkatan kebutuhan energi yang harus dipenuhi. Hal ini menyebabkan eksploitasi sumber biomassa yang lebih besar. Oleh karena itu, pemerintah harus menetapkan peraturan yang mengatur pemanfaatan dan eksploitasinya. Sumber biomassa akan menjadi langka ketika sumber bahan baku digunakan untuk berbagai tujuan. Oleh karena itu, diperlukan pengaturan dan koordinasi dalam eksploitasinya pada sektor pembangkit listrik dalam pemanfaatan dan kepentingannya (Kasmaniar *et al.*, 2023).

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Di Indonesia, pembangkit listrik tenaga uap masih mendominasi. Jika digunakan dalam jangka panjang ketersediaan batu bara akan semakin menipis. Pembangkit listrik tenaga uap juga dinilai mencemari lingkungan. Salah satu upaya meminimalisir besaran emisi adalah memanfaatkan bahan bakar yang diperoleh melalui teknologi *co-firing* dari biomassa. Total investasi modal yang dibutuhkan bergantung pada jenis dan rasio biomassa, metode *co-firing* yang telah direncanakan serta kondisi PLTU tertentu.

Saran

Peneliti memberikan saran berikut berdasarkan penelitian yang dilakukan, yaitu perlu ada penelitian secara langsung untuk mengetahui peluang dan tantangan penggunaan pembangkit listrik tenaga *co-firing* biomassa dan batu bara, metode *co-firing* tidak bisa digunakan sebagai solusi jangka panjang karena di dalam prosesnya masih menggunakan batu bara sehingga diperlukan solusi energi baru dan terbarukan lainnya yang lebih ramah terhadap lingkungan, perlu dilakukan penelitian secara langsung untuk membuktikan apakah mesin pembangkit listrik bekerja secara efisien atau tidak mengingat adanya pencampuran biomassa dan batu bara serta perlu dilakukan survei untuk mengetahui ketersediaan dan nilai ekonomi penggunaan berbagai jenis biomassa.

DAFTAR PUSTAKA

- Aditya, I. A., Haryadi, F. N., & Haryani, I. (2022). Analisis Pengujian Co-Firing Biomassa Cangkang Kelapa Sawit Pada PLTU Circulating Fluidized Bed (CFB) Sebagai Upaya Bauran Energi Terbarukan. *Jurnal ROTASI*, 24 (2), 61-66.
- Anggraini, C. P. K., Kuntjoro, Y. D., & Sasongko, N. A. (2018). Potensi Pemanfaatan Mikroalga untuk Mitigasi Emisi CO₂ (Studi Kasus di PLTU Cilacap). *Jurnal Ketahanan Energi*, 4 (1), 1-27.

- Arba, Y., Syahtaria, I., & Thamrin, S. (2022). Journal Review: Perbandingan Permodelan Perangkat Lunak Life Cycle Assessment (LCA) untuk Teknologi Energi. *Jurnal Ilmiah Multidisiplin Indonesia*, 2 (2), 300-309.
- Ariyanto, A. D., & Mustakim, L. (2023). Analisis Pengujian Co-Firing Biomassa Pada PLTU Baru Bara dengan Beberapa Bahan Bakar Alternatif Sebagai Upaya Bauran Energi Baru Terbarukan. *Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 6 (1), 98-104.
- Aszodi, A., Biro, B., Adorjan, L., Dobos, A. C., Illes, G., Toth, N. K., Zagyi, D., & Zsiboras, Z. T. (2021). Comparative Analysis of National Energy Strategies of 19 European Countries in Light of The Green Deal's Objectives. *Journal Energy Conversion and Management*, 10 (12), 1-27.
- Direktorat Jenderal EBTKE. 2023. Rencana Co-firing pada PLTU. Diakses dari portal <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-rencana-co-firing-pada-pltu.pdf> pada 10 Juli 2023 pukul 08.43 WIB.
- Erlangga, D., Huboyo, H. S., & Priyambada, I. B. 2023. Uji Efektivitas Implementasi Biomassa Pelet EFB dan Cangkang Sawit pada Co-firing di PLTU Tembilahan. *Jurnal Serambi Engineering*, 8 (2), 5376-5382.
- Kasmaniar., Yana, S., Nelly., Fitriliana., Susanti., Hanum, F., & Rahmatullah, A. (2023). Pengembangan Energi Terbarukan Biomassa dari Sumber Pertanian, Perkebunan dan Hasil Hutan: Kajian Pengembangan dan Kendalanya. *Jurnal Serambi Engineering*, 8(1), 4957-4964.
- Maghfuri, A., Thamrin, S., & Kuntjoro, Y. D., (2022). Strategi Penurunan Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Uap di Kabupaten Cilacap dalam Mendukung Nationally Determined Contribution. *Jurnal Ketahanan Energi*, 8 (1), 66-80.
- Merzic, A., Turkovic, N., Ikanovic, N., Lapandic, E., Kazagic, A., & Music, M. (2022). Towards Just Transition of Coal Regions-Cultivation of Short Rotation Copies and Dedicated Energy Crops for Biomass Co-Firing vs Photo Voltaic Power Plants. *Journal Energy Conversion and Management*, 10 (15), 1-10.
- Mujiono, D., & Akbar, Z. A. 2023. Analisa Teknik dan Keekonomian Pengolahan Biomassa Sawdust dari Hutan Tanaman Energi (THE) untuk Mendukung Program Co-Firing di PLTU Pelabuhan Ratu. *CIVED: Journal of Civil Engineering and Vocational Education*, 10 (2), 460-473. doi: <https://doi.org/10.24036/cived.v10i2.123245>
- Rizqi, H. D., Guntur, H. L., Putra, A. B. K., Kusumadewi, T. V., Nasution, A. H. Sinansari, P., & Kurniawan, F. (2022). Kajian Potensi Bambu untuk Mendukung Penerapan Co-firing pada Pembangkit Listrik Jawa Bali. *Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 7 (1), 85-90.

Sugiyono. 2018. *Metode Penelitian Pendidikan (Pendekatan Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D)*. Bandung: Alfabeta.

Zaman, A. A., & Ghosh, S. (2022). Thermo-economic and Environmental Performance Analyses of a Biomass-based Carbon Negative System Integrating Externally Fired Gas Turbine and Molten Carbonate Fuel Cell. *Journal Energy Conversion and Management*, 10 (14), 1-18.

Zhou, Z., Wang, C., & Ge, L. (2019). Operation of Stand-Alone Microgrids Considering the Load Following of Biomass Power Plants and the Power Curtailment Control Optimization of Wind Turbines. *IEEE Access*, 7 (1), 186115-186125.