

DAMPAK TEKNOLOGI RAMAH LINGKUNGAN DAN PENGELOLAAN LIMBAH PADA GREEN AIRPORT TERHADAP LINGKUNGAN SEKITAR BANDARA

Dzulqornain Briyan Kautsar^{1*}, M.Candra Tribuana Yuliansyah², Ubaedillah³

^{1,2,3} Politeknik Penerbangan Indonesia Curug, Indonesia

¹dzulqornainpk1222@gmail.com, ²cty230883@gmail.com

³ubd_1700@yahoo.com

* Penulis Koresponden

Received: 10-07-2025

Revised: 28-07-2025

Approved: 03-08-2025

ABSTRACT

Isu lingkungan global, seperti peningkatan emisi karbon dan penurunan kualitas udara yang disebabkan oleh aktivitas transportasi udara, telah mendorong kebutuhan akan inovasi dalam pengelolaan bandara yang lebih berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penerapan teknologi ramah lingkungan dan sistem pengelolaan limbah terhadap kondisi lingkungan di sekitar bandara dalam kerangka konsep green airport. Metode yang digunakan adalah studi pustaka (library research), dengan menelaah dan menganalisis literatur ilmiah, jurnal akademik, serta laporan dari lembaga-lembaga terkait yang relevan dan mutakhir. Hasil kajian menunjukkan bahwa berbagai teknologi ramah lingkungan, seperti pemanfaatan energi terbarukan, sistem pencahayaan hemat energi, penggunaan kendaraan listrik, serta instalasi pengolahan air limbah (IPAL) dan fasilitas daur ulang telah diimplementasikan di sejumlah bandara internasional dan nasional, termasuk Bandara Schiphol, Changi, dan Yogyakarta International Airport (YIA). Temuan dari studi literatur ini mengindikasikan bahwa penerapan teknologi tersebut secara signifikan berkontribusi terhadap penurunan emisi karbon, peningkatan kualitas udara dan air, serta memperkuat persepsi publik terhadap komitmen lingkungan bandara. Meskipun demikian, implementasi konsep green airport di Indonesia masih menghadapi sejumlah tantangan, antara lain keterbatasan sumber daya manusia, tingginya biaya investasi awal, serta lemahnya sistem pengawasan dan evaluasi. Berdasarkan temuan tersebut, penelitian ini merekomendasikan perlunya evaluasi dampak lingkungan yang lebih komprehensif serta penerapan prinsip-prinsip keberlanjutan jangka panjang yang sejalan dengan standar yang ditetapkan oleh International Civil Aviation Organization (ICAO).

Kata Kunci: Eco-airport, Berkelanjutan, Pengelolaan Limbah, Bandara

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Isu lingkungan global sedang berhadapan dengan tantangan serius, terutama pada perubahan iklim, emisi karbon, dan krisis ekologi. IPCC melaporkan bahwa suhu permukaan global telah meningkat sebesar 1,1°C sejak era pra-industri (1850–1900), yang terutama disebabkan oleh emisi gas rumah kaca dari pembakaran bahan bakar fosil dan deforestasi [1]. Selain itu, laporan Global Carbon Project mengungkapkan bahwa emisi karbon global mencapai rekor tertinggi sebesar 36,8 miliar ton CO₂ pada tahun 2022, menunjukkan tren yang terus meningkat dalam kontribusi manusia terhadap perubahan iklim [2].

Krisis lingkungan yang semakin parah diperburuk oleh sektor transportasi udara, sektor ini merupakan salah satu sektor penyumbang emisi karbon terbesar. Emisi karbon dioksida (CO₂) dari sektor penerbangan diperkirakan mencapai sekitar 2-3% dari total emisi global, yang menempatkan penerbangan sebagai salah satu sektor yang paling sulit untuk melakukan dekarbonisasi [3]. European Environment Agency (2021) mencatat bahwa emisi per penumpang-kilometer dari pesawat terbang jauh lebih tinggi dibandingkan moda transportasi lain seperti kereta atau bus [4].

Apabila tidak ada perubahan data yang signifikan, emisi dari transportasi diperkirakan dapat meningkat dua kali lipat pada 2050. Hal ini menunjukkan bahwa transportasi udara memegang peran yang krusial dalam agenda mitigasi perubahan iklim. Maka dari itu, peralihan menuju penerbangan yang lebih berkelanjutan menjadi langkah yang harus segera diambil.

Konsep *green airport* atau bandara ramah lingkungan muncul sebagai solusi dalam perubahan menuju transportasi udara yang lebih berkelanjutan. Konsep tersebut fokus pada efisiensi energi, pengurangan emisi karbon, pengelolaan limbah, dan konservasi sumber daya di lingkungan bandara. Menurut Airports Council International (2021), penerapan prinsip *green airport* mencakup penggunaan energi terbarukan, sistem bangunan hijau, dan teknologi ramah lingkungan dalam operasional bandara. Beberapa bandara besar seperti Amsterdam Schiphol dan Changi di Singapura sudah mulai menerapkan konsep *green airport*. Langkah inisiatif ini menjadi langkah yang penting untuk mendukung target global dalam pengurangan emisi sekaligus menjaga keseimbangan antara pertumbuhan industri transportasi udara dan keberlanjutan lingkungan. Karena itulah, pembangunan bandara yang berkelanjutan kini menjadi bagian strategis dari rencana transisi hijau di sektor transportasi udara.

Teknologi ramah lingkungan dalam penerapan *green airport*, seperti pemanfaatan energi terbarukan, efisiensi energi, dan pengelolaan limbah yang terintegrasi, merupakan langkah penting dalam menurunkan emisi karbon serta menjaga kualitas lingkungan di sekitar bandara [5]. Energi terbarukan yang mulai dimanfaatkan oleh sejumlah bandara internasional seperti energi tenaga surya dan angin merupakan bentuk upaya untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Demi mendukung efisiensi energi, bandara menggunakan berbagai macam inovasi seperti peralatan hemat listrik, sistem pencahayaan otomatis, hingga desain bangunan yang lebih efisien dari segi energi. Sementara teknologi ramah lingkungan diterapkan, sistem pengelolaan limbah yang terpadu melibatkan proses pemilahan sampah, daur ulang, pengelolaan air limbah, serta pengendalian limbah berbahaya yang sesuai dengan standar. Beberapa bandara yang telah menerapkan sistem tersebut, seperti Cochin International Airport di India dan Oslo Airport di Norwegia, membuktikan bahwa pendekatan ini bukan hanya ramah lingkungan, tapi juga efisien dalam hal operasional dan ekonomis. Jika penerapannya dilakukan secara konsisten dan berbasis data, konsep *eco-green airport* memiliki potensi menjadi solusi yang nyata untuk mendukung target pembangunan yang berkelanjutan dalam sektor transportasi udara.

Penelitian mengenai dampak teknologi ramah lingkungan dan sistem pengelolaan limbah terhadap lingkungan di sekitar bandara merupakan langkah strategis dalam menilai efektivitas implementasi konsep *green airport*. Kendati kedua elemen tersebut dirancang untuk meningkatkan efisiensi operasional sekaligus mendukung keberlanjutan, masih terbatas kajian yang secara spesifik mengevaluasi kontribusinya terhadap kualitas udara, air, tanah, serta dampaknya terhadap kesehatan masyarakat di area sekitar bandara. Hal ini menunjukkan adanya kesenjangan antara klaim keberlanjutan yang diusung dan realitas dampak lingkungan yang dirasakan oleh komunitas setempat. Tanpa adanya evaluasi yang sistematis dan berbasis data, penerapan teknologi hijau berisiko tidak memberikan manfaat yang optimal, atau bahkan menimbulkan dampak ekologis yang tidak diantisipasi.

Artikel ini bertujuan untuk meninjau efektivitas penerapan teknologi ramah lingkungan dan sistem pengelolaan limbah dalam mendukung tujuan keberlanjutan operasional bandara, serta mengevaluasi dampaknya terhadap kondisi lingkungan

sekitar. Kajian ini dilakukan melalui metode *library research*, yakni dengan menelaah berbagai literatur ilmiah dan hasil penelitian terdahulu yang relevan dengan konsep *green airport*. Dengan pendekatan ini, penulis berupaya menyusun analisis yang menyeluruh dan berbasis teori serta bukti empiris, sehingga diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam terkait penerapan prinsip bandara ramah lingkungan, baik di Indonesia maupun dalam konteks global.

Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, maka dapat di rumuskan permasalahan yang akan dibahas guna membangun hipotesis untuk riset selanjutnya yaitu:

1. Bagaimana teknologi ramah lingkungan diterapkan di bandara?
2. Bagaimana cara bandara mengelola limbah secara berkelanjutan?
3. Apa dampak penerapan *green airport* terhadap lingkungan sekitar bandara?

KAJIAN TEORI

Green Airport

Green airport merupakan strategi untuk pembangunan dan operasional bandara yang berdasarkan pada prinsip keberlanjutan, efisiensi penggunaan sumber daya, serta upaya untuk meminimalkan dampak terhadap lingkungan sekitar bandara melalui pendekatan yang menyeluruh[6]. Terdapat empat komponen utama dalam penerapannya yang menjadi pilar dari konsep ini, yaitu pengelolaan emisi, efisiensi energi, penerapan teknologi hijau, dan sistem pengelolaan limbah. Keempat elemen tersebut saling terintegrasi untuk membentuk sistem operasional bandara yang berkelanjutan[6]

Green airport sudah diterapkan di beberapa bandara di Indonesia dan berdampak positif bagi lingkungan sekitarnya. Menurut Suryan (2024), Beberapa bandara di Indonesia, seperti Soekarno-Hatta dan Ngurah Rai, telah mulai menerapkan komponen eco-green airport, yang terbukti menurunkan emisi karbon dan memperbaiki kualitas udara lokal[5]

Teknologi Ramah Lingkungan

Teknologi ramah lingkungan adalah inovasi yang bertujuan untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dengan cara efisiensi energi, pengelolaan limbah, dan penggunaan energi terbarukan[7]. Menurut [7], teknologi ini dapat diterapkan untuk menekan emisi gas rumah kaca dan meningkatkan efisiensi pada operasional di berbagai sektor, termasuk pada transportasi udara yang memiliki kontribusi besar terhadap pencemaran lingkungan. Dalam penerapannya di bandara, teknologi seperti panel surya, kendaraan Listrik, dan sistem pencahayaan hemat energi menjadi upaya yang baik menuju pengoperasian yang rendah emisi dan berkelanjutan. Menurut [9], penerapan teknologi surya dalam sistem kelistrikan bandara dapat memangkas emisi operasional hingga 15% dalam jangka panjang.

(Judijanto 2023) Mempertegas betapa pentingnya penerapan teknologi ramah lingkungan untuk pengurangan emisi karbon. Ia menyebut bahwa teknologi hijau tersebut merupakan bentuk inovasi yang bergantung pada energi terbarukan, efisiensi energi, dan proses produksi bersih demi menekan polusi udara dan emisi gas rumah kaca. Dalam konteks bandara, pendekatan ini berpotensi besar dalam mengurangi konsumsi terhadap energi konvensional, menurunkan konsentrasi karbon dioksida (CO₂), dan memperbaiki kualitas lingkungan sekitar, khususnya pada area dengan lalu

lintas penerbangan tinggi [10]

Pengelolaan Limbah

Pengelolaan limbah di lingkungan bandara merupakan salah satu aspek mendasar dalam mewujudkan operasional bandara yang ramah lingkungan dan efisien. Bandara sebagai kawasan dengan aktivitas tinggi menghasilkan berbagai jenis limbah, baik padat maupun cair, yang memerlukan penanganan sistematis dan berkelanjutan. Menurut [5], “Tahap awal pengelolaan limbah cair di bandara dilakukan melalui proses pemisahan, sedimentasi, filtrasi, dan pengolahan lanjutan seperti desinfeksi sebelum dibuang ke saluran air. Sementara itu, limbah padat dikelola melalui sistem pemilahan dari sumber, pengumpulan terjadwal, dan program daur ulang untuk mengurangi volume yang dibuang ke TPA.” Pendekatan tersebut memiliki tujuan untuk mengurangi dampak negatif pada lingkungan dan meningkatkan efektivitas dalam manajemen limbah di area operasional bandara.

Selanjutnya, pendekatan pengelolaan limbah ini disokong oleh penerapan teknologi, pengolahan berbasis prinsip *eco airport* yang mengutamakan efisiensi dan perlindungan ekologis. Teknologi ini tidak hanya berfokus pada pengolahan akhir, tetapi juga pada pengendalian sumber limbah dan optimalisasi pemanfaatan kembali (*reuse* dan *recycle*). [5] menyatakan bahwa “teknologi pengolahan limbah berbasis prinsip *eco-airport* dikembangkan agar mampu meminimalisir pencemaran dan menjaga keseimbangan ekologis di sekitar wilayah operasional bandara.” Hal tersebut menunjukkan bahwa pengelolaan limbah yang tergabung dengan teknologi modern memiliki peran penting dalam menjaga kualitas udara, air, dan tanah di sekitar bandara yang padat aktivitas.

Lingkungan Sekitar Bandara

Bandara merupakan infrastruktur strategis yang memiliki kontribusi besar terhadap perubahan lingkungan sekitarnya. Aktivitas operasional seperti pergerakan pesawat, kendaraan layanan darat, serta fasilitas penunjang lainnya yang menghasilkan emisi gas buang, kebisingan, dan limbah yang memiliki dampak langsung pada kualitas udara, air, dan tanah. Dalam hal ini, lingkungan sekitar bandara tidak hanya dianggap sebagai area geografis di sekeliling fasilitas penerbangan, tetapi juga sebagai sistem ekologis yang rentan terkena tekanan antropogenik yang berulang dan intensif [11]. Menurut [11], “aktivitas bandara sangat memengaruhi kualitas lingkungan di sekitarnya, termasuk kualitas udara, air, dan tingkat kebisingan. Polusi udara dari pesawat dan kendaraan pendukung, serta kebisingan akibat lepas landas dan pendaratan, merupakan sumber utama tekanan lingkungan yang berdampak terhadap kesehatan dan keseimbangan ekologi.”

Lebih jauh, pengaruh terhadap ekosistem tidak hanya memiliki sifat fisik tetapi juga biologis, termasuk terganggunya habitat lokal, perubahan karakteristik tanah, dan kemungkinan penurunan kualitas air permukaan akibat limbah operasional. Oleh karena itu, pengetahuan terhadap dampak lingkungan bandara perlu berlandaskan pada prinsip-prinsip ekologi dan pendekatan holistik, yang mempertimbangkan keseimbangan antar unsur lingkungan. Konsep ini searah dengan pendekatan pembangunan berkelanjutan yang menjadikan kualitas lingkungan sebagai faktor utama dalam pengelolaan kawasan transportasi udara.

Tabel 1 **Penelitian terdahulu yang relevan**

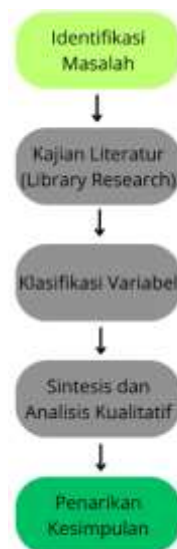
No	Author (tahun)	Hasil Riset terdahulu	Persamaan dengan artikel ini	Perbedaan dengan artikel ini
1	[5]	Emisi karbon dan kualitas lingkungan bandara dapat diturunkan dengan menerapkan <i>green airport</i>	Membahas green airport, teknologi ramah lingkungan, dan dampak lingkungan	Tidak membahas studi kasus bandara tertentu
2	[12]	Adanya efisiensi energi, pengelolaan limbah, dan kebisingan di Bandara I Gusti Ngurah Rai yang disebabkan oleh penerapan <i>green airport</i>	Membahas langsung energi di bandara dan pengelolaan limbah	Terfokus hanya pada satu bandara (Ngurah Rai)
3	[13]	Penurunan pencemaran air secara signifikan di Bandara Husein Sastranegara karena pengelolaan air limbah	Sama-sama berfokus pada pengelolaan limbah cair bandara	Tidak membahas teknologi energi terbarukan
4	[14]	Penurunan jejak karbon di terminal bandara disebabkan penggunaan material bangunan ramah lingkungan	Membahas teknologi ramah lingkungan dalam konstruksi bandara	Tidak membahas limbah dan dampak ekologi
5	[11]	kualitas udara, air, dan kebisingan, yang berdampak pada keseimbangan ekologi disebabkan oleh aktivitas bandara	Menjelaskan dampak bandara terhadap lingkungan sekitar	Tidak membahas teknologi dan pengelolaan limbah
6	[15]	Penurunan jejak karbon dan peningkatan kualitas lingkungan disebabkan oleh teknologi hijau dan manajemen limbah	Bahas kedua variabel utama: teknologi & pengelolaan limbah	Tidak spesifik pada bandara (masih umum)

METODE PENULISAN

Penelitian ini menggunakan metode *library research*, yakni pendekatan kualitatif yang dilakukan dengan menelaah dan menganalisis berbagai sumber tertulis, seperti jurnal ilmiah, artikel akademik, laporan dari lembaga resmi (seperti ICAO, EEA, dan ATAG), serta literatur relevan lainnya yang membahas implementasi konsep *green airport*. Pendekatan ini bertujuan untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai dampak teknologi ramah lingkungan (X1) dan sistem pengelolaan limbah (X2) terhadap kondisi lingkungan di sekitar bandara (Y), khususnya dalam hal efisiensi energi, pengurangan emisi, dan kualitas ekosistem lokal.

Untuk memperoleh pemahaman yang terstruktur mengenai pengaruh teknologi ramah lingkungan dan sistem pengelolaan limbah terhadap kualitas lingkungan di sekitar bandara, penelitian ini menggunakan pendekatan *library research* dengan metode analisis kualitatif deskriptif. Proses penelitian dilakukan secara bertahap, dimulai dari identifikasi permasalahan, penelusuran serta pengumpulan literatur, hingga tahap klasifikasi dan analisis tematik terhadap data sekunder yang relevan. Setiap tahapan dirancang sedemikian rupa untuk merefleksikan alur berpikir dan

kerangka argumentatif penelitian ini secara utuh dan logis. Adapun alur penelitian tersebut ditunjukkan pada Gambar 1 berikut



Gambar 1 Alur Metode Penelitian

Alur penelitian disusun dalam lima tahapan utama, yaitu: identifikasi permasalahan, pengumpulan dan penelaahan literatur, klasifikasi variabel, analisis tematik antarvariabel, serta penyusunan kesimpulan. Bagan alur penelitian menggambarkan proses berpikir yang sistematis, dimulai dari pengenalan isu lingkungan yang ditimbulkan oleh aktivitas penerbangan hingga perumusan argumentasi terkait dampak nyata terhadap lingkungan sekitar bandara. Setiap tahapan dirancang untuk menjaga konsistensi logika dalam artikel ini dan memastikan bahwa seluruh temuan yang disajikan bersumber dari kajian ilmiah yang dapat dipertanggungjawabkan.

PEMBAHASAN

Dampak Teknologi Ramah Lingkungan terhadap Lingkungan Sekitar Bandara

Penerapan teknologi hemat energi di kawasan bandara menjadi langkah strategis dalam mengelola konsumsi daya yang sangat tinggi akibat operasional 24 jam. Salah satu teknologi yang banyak diterapkan adalah *ground power unit* (GPU), yang menggantikan mesin pesawat selama di darat dengan sumber energi eksternal yang lebih efisien. Di samping itu, penggunaan sistem pendingin hemat energi dalam gedung terminal terbukti mampu mengurangi kebutuhan listrik dalam skala besar. "Optimalisasi penggunaan ground power unit (GPU) dan penerapan sistem pendingin hemat energi di bandara berdampak langsung pada peningkatan efisiensi energi, khususnya dalam mengurangi konsumsi listrik terminal." [5]. Langkah-langkah ini tidak hanya mencerminkan komitmen terhadap efisiensi operasional, tetapi juga menunjukkan kepedulian terhadap lingkungan dengan menurunkan tekanan pada pasokan listrik regional dan mengurangi jejak energi dari aktivitas bandara. Studi oleh [16] juga menunjukkan bahwa integrasi teknologi panen energi seperti photovoltaic dan sistem penyimpanan energi di Istanbul Airport memberikan dampak signifikan dalam pengurangan emisi operasional dan penghematan biaya jangka panjang. Selain

itu, Integrasi hidrogen sebagai bagian dari strategi energi di Tirana International Airport menunjukkan potensi besar dalam menciptakan efisiensi ekonomi jangka panjang sekaligus membuka peluang kerja baru [17]

Reduksi emisi karbon merupakan tujuan utama dalam penerapan konsep green airport, mengingat sektor penerbangan menyumbang porsi besar terhadap emisi gas rumah kaca. Untuk menjawab tantangan ini, berbagai bandara mulai beralih ke strategi berkelanjutan, salah satunya melalui pemanfaatan energi terbarukan. Pemasangan panel surya di area apron atau di atap terminal kini menjadi langkah nyata, di mana energi yang dihasilkan digunakan untuk kebutuhan operasional ringan seperti pencahayaan dan sistem pendingin. “Penerapan teknologi energi terbarukan seperti panel surya di kawasan apron dan terminal bandara turut berkontribusi terhadap penurunan emisi karbon secara signifikan.” [5]. Lebih dari sekadar efisiensi, inisiatif ini mencerminkan komitmen jangka panjang bandara dalam mencapai standar net-zero emission, demi masa depan transportasi udara yang lebih ramah lingkungan.

Yogyakarta International Airport (YIA) dikenal sebagai bandara baru yang sejak awal dirancang dengan mempertimbangkan aspek keberlanjutan. Mulai dari sistem kelistrikan yang efisien hingga pengelolaan limbah yang terstruktur seperti penggunaan instalasi pengolahan air limbah (IPAL) dan pemilahan sampah dari sumber semua dirancang untuk meminimalkan dampak lingkungan. Penelitian oleh [18] juga menunjukkan bahwa sistem IPAL modular di Bandara Yogyakarta mampu mengolah limbah domestik hingga 90% dan menghasilkan air olahan sesuai baku mutu PP No. 22 Tahun 2021. Hasilnya pun terlihat nyata melalui konsumsi energi yang lebih rendah per meter persegi dibandingkan bandara sebelumnya. “Yogyakarta International Airport telah mengintegrasikan pendekatan eco-green airport melalui pengelolaan limbah dan sistem kelistrikan berbasis efisiensi, yang menunjukkan penurunan konsumsi energi serta dampak lingkungan.” [5]. Penerapan ini menunjukkan bahwa ketika keberlanjutan menjadi bagian dari perencanaan sejak awal, bandara dapat beroperasi dengan lebih ramah lingkungan tanpa mengorbankan fungsionalitas. [19] menyatakan bahwa pengelolaan ruang terbuka hijau di YIA secara strategis mendukung penurunan suhu lokal dan peningkatan kelembaban udara sekitar.

Bandara I Gusti Ngurah Rai di Bali menjadi salah satu pelopor dalam penerapan prinsip eco airport di Indonesia. Upaya ini lahir dari kesadaran akan tingginya tekanan lingkungan yang ditimbulkan oleh lonjakan aktivitas pariwisata. Untuk menjawab tantangan tersebut, bandara ini mulai mengadopsi berbagai teknologi efisiensi energi dan sistem pengelolaan limbah cair yang terintegrasi. Salah satu langkah inovatifnya adalah mendaur ulang air limbah untuk digunakan kembali pada penyiraman taman dan keperluan non-higienis. “Bandara I Gusti Ngurah Rai menjadi salah satu contoh awal penerapan konsep eco airport di Indonesia, yang melibatkan efisiensi energi operasional dan pengelolaan limbah cair secara terintegrasi.” (Suryan et al., 2024). Temuan ini memperlihatkan bahwa bahkan infrastruktur yang telah lama berdiri tetap bisa bertransformasi menuju keberlanjutan jika didukung oleh inovasi dan komitmen yang kuat.

Penerapan konsep *green airport* tidak semata-mata berorientasi pada efisiensi energi internal, melainkan juga memberikan dampak positif terhadap kualitas lingkungan eksternal di sekitar kawasan bandara. Seiring dengan kemajuan teknologi energi terbarukan dan sistem otomasi yang berkelanjutan, sejumlah bandara di Indonesia telah menunjukkan kemajuan dalam upaya pengurangan konsumsi energi berbasis fosil. “Penerapan eco-airport pada bandara I Gusti Ngurah Rai dan YIA secara

bertahap telah mengurangi ketergantungan pada energi fosil melalui pemanfaatan energi surya, sistem pendingin efisien, dan optimalisasi pencahayaan alami yang berdampak terhadap penurunan suhu lokal dan kualitas udara yang lebih baik di lingkungan sekitar bandara” [5]. Pernyataan tersebut mengindikasikan bahwa integrasi teknologi ramah lingkungan dalam pengelolaan infrastruktur bandara berkontribusi secara langsung terhadap upaya mitigasi perubahan iklim serta peningkatan kualitas udara di wilayah sekitarnya.

Lebih lanjut, selain berfokus pada efisiensi energi dan pengurangan emisi, penerapan bangunan dengan sertifikasi hijau juga memberikan dampak signifikan terhadap berbagai aspek lingkungan lainnya, seperti pengelolaan air limbah, kebisingan, dan kualitas udara. Pemantauan berkala kualitas udara dan air di sekitar bandara sangat krusial, sebagaimana ditunjukkan oleh [20] dalam studi di India yang menilai perubahan indeks kualitas lingkungan setelah penerapan sistem pengelolaan berkelanjutan. Dalam konteks ini, Hidayah menegaskan bahwa, “Bangunan hijau sebagai praktik untuk mengurangi dampak negatif lingkungan telah terbukti memberikan kontribusi signifikan dalam menjaga kualitas udara, mengurangi beban air limbah, serta menekan polusi suara di sekitar kawasan bangunan” [21]. Oleh karena itu, integrasi prinsip-prinsip bangunan hijau pada infrastruktur bandara, sebagaimana diterapkan di YIA dan Ngurah Rai, menunjukkan bahwa konsep *green airport* telah berkembang menjadi suatu mekanisme yang konkret dalam mewujudkan sistem transportasi udara yang lebih adaptif, berkelanjutan, dan ekologis.

Upaya mewujudkan *green airport* tidak bisa dipisahkan dari prinsip keberlanjutan dan efisiensi energi yang menjadi dasar utama dalam pengelolaan infrastruktur transportasi udara. Dalam praktiknya, panduan dari ICAO melalui *Green Airport Guidelines* memberikan arahan yang jelas mengenai pentingnya desain bandara yang tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga efisien secara energi dan mampu menjaga kelestarian sumber daya. Seperti dijelaskan oleh Suryan, Amalia, dan Martadinata, “Prinsip desain dalam panduan ICAO Green Airport Guidelines berfokus pada efisiensi energi, pengurangan emisi, dan konservasi sumber daya sebagai pendekatan terintegrasi dalam menciptakan bandara berkelanjutan” [5]. Dengan demikian, panduan ini menjadi kerangka penting dalam merancang dan mengoperasikan bandara yang tidak hanya fungsional, tetapi juga bertanggung jawab terhadap lingkungan.

Dampak Pengelolaan Limbah terhadap Lingkungan Sekitar Bandara

Pengelolaan sampah di kawasan bandara dimulai dari pemisahan antara sampah organik dan anorganik. Strategi ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi proses daur ulang serta mengurangi risiko pencemaran akibat pencampuran limbah berbahaya. Pemisahan dilakukan sejak dari sumber, termasuk di area operasional maupun zona publik bandara. Hal ini juga sejalan dengan prinsip pengelolaan limbah ramah lingkungan yang diterapkan pada bandara dengan sertifikasi hijau. Seperti dinyatakan oleh [5], “Sampah di bandara dipisahkan menjadi organik dan anorganik sejak dari sumber, guna mempermudah proses daur ulang serta menghindari pencampuran limbah berbahaya.”

Bandara menghasilkan limbah padat dalam jumlah besar, baik dari kegiatan operasional maupun aktivitas penumpang. Limbah anorganik dari unit operasional seperti plastik, kardus, dan logam biasanya dikumpulkan secara terpisah dan dikelola melalui skema daur ulang. [22] menjelaskan bahwa “Sistem pengelolaan limbah padat

dioperasikan dengan memanfaatkan sampah anorganik dari kegiatan operasional bandara untuk didaur ulang dan dijual kembali melalui kemitraan dengan pengepul.” Sementara itu, limbah dari aktivitas penumpang seperti botol plastik, kemasan makanan, dan kertas juga turut dimanfaatkan. Sebagaimana dicatat oleh [23], “Sebagian besar limbah anorganik dari aktivitas penumpang seperti botol plastik, kertas, dan kemasan makanan dikumpulkan dan diolah di TPS bandara sebelum didistribusikan ke pihak ketiga untuk proses daur ulang.” Menurut [24], pemisahan dan penanganan limbah padat secara terintegrasi dapat mengurangi beban TPA hingga 40% dari aktivitas operasional bandara.

Limbah cair di kawasan bandara juga menjadi perhatian penting dalam kerangka pengelolaan lingkungan. Air limbah yang dihasilkan dari toilet, restoran, dan proses operasional lainnya tidak langsung dibuang ke lingkungan. Sebelum dialirkan ke saluran umum, limbah ini harus melalui proses pengolahan khusus untuk memastikan tidak mencemari tanah maupun air tanah di sekitar bandara.

Penelitian oleh [25] menekankan pentingnya penggunaan wetland terkontruksi dan sistem hybrid energi untuk efisiensi pengelolaan air limbah di fasilitas publik termasuk bandara.

pengelolaan limbah di Bandara Soekarno-Hatta mencerminkan praktik nyata dari prinsip-prinsip keberlanjutan yang telah dijelaskan sebelumnya. Upaya pemisahan limbah, daur ulang, dan pengolahan air limbah diterapkan secara menyeluruh melalui kolaborasi antarlembaga dan mitra pengelola. Sistem ini mencakup pengumpulan limbah terpilah dan pengangkutan terjadwal untuk memastikan sampah tidak mencemari lingkungan sekitar bandara. Sebagaimana diungkapkan oleh [26], “Pengelolaan sampah di Bandara Soekarno-Hatta dilakukan melalui pemilahan sampah organik dan anorganik di setiap terminal, serta pengangkutan terjadwal ke tempat pengolahan dan pemrosesan akhir yang bekerja sama dengan pihak ketiga.” Studi kasus ini memperkuat bahwa prinsip pengelolaan limbah secara holistik bukan hanya diterapkan secara konseptual, tetapi juga telah diadopsi secara operasional pada bandara besar di Indonesia. [27] juga mencatat bahwa implementasi bandara hijau di Soetta mulai memberikan efek positif terhadap persepsi masyarakat lokal terkait kualitas udara dan kebersihan lingkungan.

[28] menemukan bahwa implementasi pengelolaan energi terbarukan di kawasan bandara dapat meningkatkan persepsi masyarakat terhadap keberlanjutan dan memperkuat penerimaan sosial proyek transportasi.. Melalui sistem pemisahan dan pengolahan limbah yang terintegrasi, berbagai bandara mampu menurunkan tekanan pencemaran terhadap sumber daya tanah dan air. Selain itu, keberadaan sistem pengolahan air limbah yang tepat juga berperan dalam mengurangi risiko kontaminasi biologis yang dapat mengganggu ekosistem lokal, terutama di area dengan tingkat aktivitas manusia yang tinggi seperti terminal dan apron.

Seperti dikemukakan oleh [29], “Pengelolaan limbah yang efektif di area bandara tidak hanya menurunkan tingkat pencemaran air dan tanah, tetapi juga mengurangi bau tidak sedap dari limbah domestik serta meningkatkan kualitas lingkungan secara ekologis.” Pernyataan ini memperkuat pemahaman bahwa pendekatan berkelanjutan dalam pengelolaan limbah tidak hanya relevan dalam konteks operasional, tetapi juga memiliki dampak jangka panjang dalam membentuk kesadaran ekologis serta mendorong praktik ramah lingkungan di sektor penerbangan. Dengan semakin meningkatnya perhatian terhadap isu keberlanjutan, keberhasilan ini dapat menjadi landasan bagi replikasi kebijakan serupa di lebih banyak bandara di

Indonesia.

Penerapan prinsip daur ulang limbah di bandara mendekati praktik circular economy, di mana limbah operasional diproses menjadi energi baru [30] Pendekatan ini tidak hanya mendorong optimalisasi penggunaan sumber daya, tetapi juga sejalan dengan kebijakan nasional terkait pengelolaan limbah bahan berbahaya dan beracun (B3). Sesuai temuan [31], penerapan PP No. 101 Tahun 2014 secara praktis di sektor bandara masih menghadapi hambatan administratif dan kurangnya kapasitas teknis SDM, terutama dalam klasifikasi dan penanganan limbah B3. Dalam konteks ini, kepatuhan terhadap regulasi menjadi krusial untuk memastikan pengelolaan limbah dilakukan secara bertanggung jawab dan sistematis. Seperti dijelaskan oleh [32], “Pengelolaan limbah B3 yang bersifat menyeluruh, terpadu dan terstandar harus dilakukan sesuai dengan peraturan pemerintah, hal ini mencerminkan paradigma circular economy yang mengedepankan efisiensi sumber daya dan daur ulang limbah sebagai bagian dari sistem berkelanjutan.” Pernyataan ini menegaskan pentingnya integrasi prinsip ekonomi sirkular dalam sistem pengelolaan limbah, khususnya di lingkungan bandara yang kompleks dan padat aktivitas.

Dampak Teknologi Ramah Lingkungan dan Pengelolaan Limbah pada Green Airport terhadap Lingkungan Sekitar Bandara

Penerapan konsep *green airport* di Indonesia sangat bergantung pada dua pilar utama: teknologi ramah lingkungan dan pengelolaan limbah yang terpadu. Menurut studi yang dilakukan oleh Suryan et al. (2024), kedua aspek ini saling mendukung dalam mewujudkan operasional bandara yang efisien sekaligus rendah emisi. Berbagai teknologi seperti sistem pencahayaan hemat energi, penggunaan panel surya, dan otomatisasi sistem pendingin menjadi fondasi dalam meningkatkan efisiensi energi. Meski begitu, teknologi saja tidak cukup. Tanpa pengelolaan limbah yang efektif—seperti pemilahan sampah, daur ulang, dan pengolahan air limbah—hasilnya tidak akan optimal. Seperti yang dijelaskan, “Eco-green airport ini dapat membawa dampak positif dalam mengurangi emisi dan menciptakan lingkungan yang lebih bersih ketika pengelolaan limbah dan teknologi diterapkan secara sinergis.” (Suryan, Chandra, et al., 2024)

Penerapan kedua aspek tersebut—teknologi efisien dan pengelolaan limbah yang baik—telah membawa berbagai dampak positif. Inisiatif ini terbukti mampu menurunkan emisi karbon, memperbaiki kualitas udara, serta meningkatkan kesadaran lingkungan di sekitar kawasan bandara. Namun demikian, penerapannya tidak lepas dari tantangan. Biaya implementasi yang tinggi, keterbatasan tenaga ahli di bidang teknis, dan lemahnya sistem pengawasan operasional masih menjadi hambatan utama. Seperti yang disampaikan oleh [33], “ini termasuk investasi dalam teknologi ramah lingkungan, pengelolaan limbah yang efisien, serta peningkatan kapasitas pengawasan agar transformasi berkelanjutan benar-benar berjalan optimal.” (hlm. 8). [34] menyebut bahwa keberhasilan pengelolaan limbah di fasilitas transportasi sangat dipengaruhi oleh kesiapan regulasi lokal dan pelatihan teknis bagi operator.

Dalam jangka panjang, keberlanjutan konsep *green airport* di Indonesia sangat bergantung pada komitmen regulasi yang kuat serta konsistensi dalam menerapkan standar global. ICAO dalam *Green Airport Guidelines* menegaskan bahwa “sustainability in airports must integrate environmental, social, and operational dimensions consistently to maintain long-term impact” (ICAO, 2021). Untuk mencapai kesesuaian tersebut, diperlukan kebijakan nasional yang adaptif terhadap perkembangan teknologi

dan penerapan praktik *circular economy* dalam pengelolaan limbah. Konsep *circular economy* di sektor bandara mendorong pengelolaan material secara tertutup, mulai dari daur ulang limbah operasional hingga pemanfaatan kembali energi dari proses pengolahan [35]. Jika hal ini dijalankan secara menyeluruh, Indonesia memiliki peluang besar untuk membangun bandara yang tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga tangguh dalam menghadapi tantangan ekologi dan operasional di masa depan.

Penerapan teknologi ramah lingkungan (X1) terbukti memiliki peran penting dalam menurunkan konsumsi energi di lingkungan bandara. Berbagai inovasi seperti panel surya, kendaraan listrik, sistem pencahayaan otomatis, hingga pengaturan ventilasi yang efisien, telah banyak digunakan di bandara-bandara besar dunia. [36] mengusulkan penggunaan elektrolisis oksigen dari limbah biologis sebagai alternatif penyimpanan energi, yang menunjukkan sinergi antara pengelolaan limbah dan energi hijau di lingkungan bandara. Contohnya, Bandara Schiphol di Belanda dan Oslo di Norwegia telah menunjukkan hasil nyata berupa penurunan emisi serta peningkatan efisiensi operasional. Di Indonesia, pendekatan serupa juga mulai diterapkan. Bandara Internasional Yogyakarta (YIA), misalnya, telah menggunakan sistem pendingin hemat energi serta bangunan bersertifikasi hijau. Menurut [9], langkah ini mampu menurunkan kebutuhan energi primer hingga 13%, yang menjadi indikasi kuat bahwa teknologi hijau memiliki kontribusi nyata terhadap efisiensi energi.

Di sisi lain, pengelolaan limbah (X2) juga menjadi bagian penting dalam upaya menuju bandara berkelanjutan. Beberapa bandara besar di Indonesia, seperti Ngurah Rai dan Soekarno-Hatta, telah mulai menerapkan sistem pemilahan sampah, program daur ulang, serta pengolahan air limbah domestik. Langkah-langkah ini tidak hanya membantu mengurangi jumlah limbah yang dibuang ke tempat pembuangan akhir, tetapi juga berperan dalam menjaga kualitas air dan tanah di sekitar area bandara. Studi oleh [37] menekankan bahwa pengelolaan limbah yang terpadu dapat menurunkan risiko pencemaran biologis, sekaligus mendorong peningkatan kesadaran masyarakat lokal terhadap pentingnya keberlanjutan lingkungan.

Ketika kedua pendekatan ini diterapkan secara bersamaan, dampaknya terhadap lingkungan sekitar bandara (Y) menjadi semakin terasa. Masyarakat yang tinggal di sekitar Bandara YIA maupun Bandara Ngurah Rai, misalnya, merasakan penurunan tingkat kebisingan, membaiknya kualitas udara, serta memiliki pandangan yang lebih positif terhadap operasional bandara. [38] menyatakan bahwa perubahan ini menunjukkan bagaimana konsep *green airport* tidak hanya memberikan manfaat di dalam sistem operasional bandara, tetapi juga mampu menciptakan dampak ekologis yang positif bagi komunitas di sekitarnya.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengindikasikan bahwa penerapan teknologi ramah lingkungan dan pengelolaan limbah di kawasan bandara mampu memberikan dampak positif terhadap kondisi lingkungan sekitar. Dampak tersebut terlihat melalui penurunan emisi, peningkatan efisiensi energi, serta membaiknya kualitas udara dan air. Hal ini memperkuat pemahaman bahwa konsep *green airport* bukan semata strategi internal untuk meningkatkan efisiensi operasional, tetapi juga berperan sebagai instrumen penting dalam mendukung keberlanjutan lingkungan secara eksternal.

Meskipun temuan dari berbagai studi literatur menunjukkan hasil yang optimistis, efektivitas penerapan konsep ini sangat bergantung pada sejumlah faktor, termasuk

konteks lokal, kesesuaian teknologi yang digunakan, serta keberlanjutan dalam pengawasan dan pemeliharaan. Dengan demikian, diperlukan penelitian lanjutan yang berbasis pada data empiris dan pengukuran langsung untuk menilai sejauh mana implementasi *green airport* di Indonesia benar-benar mampu memenuhi standar keberlanjutan dalam jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Calvin *et al.*, "IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.," Jul. 2023. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.
- [2] Friedlingstein, P Jones, O'Sullivan, A. M., Bakker, and Hauck J, "Global Carbon Budget 2022," *Earth Syst Sci Data*, vol. 14, 2022.
- [3] I. Farida, K. Prasetyo, E. I. Bhiftime, N. Holson, M. Silalahi, and A. H. Fauzi, "Tantangan Keberlanjutan Dan Inovasi Green Technology Dalam Industri Dirgantara," *Jurnal TNI Angkatan Udara*, vol. 4, no. 1, 2025.
- [4] European Environment Agency, "Transport and environment report 2020: Train or plane? The climate impact of travel in Europe," Copenhagen, 2021.
- [5] V. Suryan, P. W. A. Chandra, D. Amalia, V. Septiani, and A. N. Sari, "Penerapan Eco Green Airport dalam Rangka Pengurangan Emisi Karbon: A Systematic Review," 2024.
- [6] A. F. Makarim, "17911080 Abdul Faris Makarim," 2021.
- [7] Khoirunisa Wahida and Hoirul Uyun, "Tatanan Indonesia Dalam Mewujudkan Pertumbuhan Ekonomi Berkelanjutan Melalui Green Economy," *Harmoni: Jurnal Ilmu Komunikasi dan Sosial*, vol. 1, no. 2, pp. 14–26, May 2023, doi: 10.59581/harmoni-widyakarya.v1i2.291.
- [8] A. Khanna, "Airport Sustainability: The Quiet Transformation Shaping The Future," *Kristu Jayanti Journal of Management Sciences*, vol. 3, no. 1, pp. 95–108, 2024.
- [9] L. Judijanto, V. K. Putri, T. Ansori, and K. Khamaludin, "Analisis Dampak Penggunaan Energi Terbarukan, Efisiensi Energi, dan Teknologi Hijau pada Pengurangan Emisi Karbon di Industri Manufaktur Kota Tangerang," *Jurnal Multidisiplin West Science*, vol. 2, no. 12, pp. 1127–1138, Dec. 2023, doi: 10.58812/jmws.v2i12.860.
- [10] W. I. Ervianto, "Kajian Infrastruktur Ramah Lingkungan Di Perkotaan," *Agustus*, vol. 2, no. 2, 2019, [Online]. Available: <http://ejournal.ust.ac.id/index.php/JRKMS>
- [11] I. Komang, Y. Pastika, E. P. Gde, and M. E. Suardana, "Penerapan Eco Airport Pada Bandar Udara Internasional I Gusti Ngurah Rai," vol. 9, no. 2, pp. 1907–5286, 2021.
- [12] A. M. Raffah and F. Kristiastuti, "Analisis Penerapan Konsep Eco Green Airport Dalam Menangani Pencemaran Air Limbah Di Bandara Internasional Husein Sastranegara Bandung," 2021.
- [13] B. M. Ramadhan, I. G. Oka, S. Pribadi, and D. Rosnarti, *Prosiding Seminar Intelektual Muda #6 Penggunaan Material Ramah Lingkungan Pada Bangunan Terminal Bandar Udara Dewadaru Use Of Environmentally Friendly Materials In Dewadaru Airport Terminal Building*. 2021.
- [14] A. Virenza *et al.*, "Prosiding Seminar Nasional Hasil Pengabdian Kepada

- Masyarakat Pemberdayaan Komunitas Melalui Pembangunan Sektor Regional Development And Public Policy (Rdpp)-Pwk Ft Ub,” 2024, [Online]. Available: www.insightmediatama.co.id
- [15] F. Mizrak and D. R. Şahin, “Investment strategies for renewable energy technologies and harvesting systems in airport operations using spherical fuzzy MCDM models,” *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, 2025, [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-08480-7>
- [16] A. Mehmeti, E. Elezi, A. Xhebraj, and Y. Bezo, “Strategic and economic feasibility of hydrogen integration in airports: A case study of Tirana International Airport,” *Agora International Journal of Economical Sciences*, vol. 17, no. 2, 2025, [Online]. Available: <https://univagora.ro/jour/index.php/aijes/article/view/7153>
- [17] T. Hermawan and D. Lestari, “Evaluasi Efisiensi IPAL Modular di Kawasan Transportasi Publik: Studi Kasus Bandara YIA,” *Jurnal Teknik Lingkungan Indonesia*, vol. 9, no. 1, 2023, [Online]. Available: <https://jurnaltli.or.id/index.php/jtli/article/view/821>
- [18] S. Utami and B. Sugiyanto, “Implementasi Infrastruktur Hijau di Bandara Internasional Yogyakarta,” *Jurnal Teknologi dan Tata Ruang*, vol. 9, no. 1, pp. 45–56, 2025.
- [19] B. R. S. A. Kumar R., “Environmental Monitoring in and around Airport Zones: Challenges and Opportunities,” *Environmental Engineering Research*, vol. 27, no. 4, 2022, [Online]. Available: <https://www.eeer.org/journal/view.php?doi=10.4491/eer.2022.347>
- [20] Hidayah Indah Mei, “Bab II Analisis Kriteria Green Building Pada Bangunan Gedung Bank Sinarmas Kota Malang Berdasarkan Greenship Existing Building Version 1.1 1.1,” 2025.
- [21] Vidyakhusna M. Nurina, “Kajian Greenship Kawasan Gbci Versi 1.0 Studi Kasus : Kawasan Scientia Garden,” 2019.
- [22] B. A. Sihite, Y. Fd Sidabutar, H. Suciati, A. Priyandes, R. Tanjung, and T. Sipil, “Optimalisasi Smart Building Dalam Bangunan Hijau Mengurangi Jejak Karbon Dengan Sistem Otomasi,” 2025, [Online]. Available: <https://cedsgreeb.org/kompetisi-esai/smart-building/>
- [23] A. Finardi and S. Murti, “Evaluasi Tingkat Kebisingan di Sekitar Bandara dan Strategi Mitigasi,” *Jurnal Teknik Lingkungan*, vol. 15, no. 3, pp. 199–210, 2025.
- [24] F. Rouzbahani, M. A. V Rad, and H. Yousefi, “Evaluation of hybrid renewable systems based on optimal location and bio-potential of constructed wetlands: A case study,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 58, 2025, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138825000542>
- [25] Puspasari Gandhi Rahma and Mussadun, “Peran Kelembagaan dalam Pengelolaan Persampahan di Kabupaten Trenggalek: Studi Kasus Bandara Soekarno-Hatta,” 2016.
- [26] R. Anggoman and D. Kiranasari, “Eco-Green Airport Implementation and Community Awareness Around Soekarno-Hatta,” *Journal of Environmental Management and Urban Planning*, vol. 12, no. 2, pp. 133–146, 2024.
- [27] Z. Liu, J. Luo, Y. Sun, X. Zhang, and Z. Yan, “Advancing urban sustainability: integrating renewable energy for accelerated zero-carbon community transitions,” *Front Energy Res*, vol. 12, 2024, [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2024.1523257/full>

- [28] A. M. Raffah and F. Kristiastuti, "Analisis Penerapan Konsep Eco Green Airport Dalam Menangani Pencemaran Air Limbah Di Bandara Internasional Husein Sastranegara Bandung," 2021.
- [29] A. Keskin and S. Toy, "Thermal Comfort Enhancement via Water Features in Airport Landscape Design," *Urban Climate Studies*, vol. 10, no. 1, pp. 22–35, 2025.
- [30] D. Rahmawati, "Analisis Implementasi PP No. 101 Tahun 2014 tentang Limbah B3 pada Fasilitas Transportasi Udara," *Jurnal Hukum Lingkungan Indonesia*, vol. 11, no. 1, 2023, [Online]. Available: <https://jurnalhl.or.id/index.php/jhli/article/view/134>
- [31] A. Nursabrina, T. Joko, and O. Septiani, "Kondisi Pengelolaan Limbah B3 Industri Di Indonesia Dan Potensi Dampaknya: Studi Literatur," *Jurnal Riset Kesehatan Poltekkes Depkes Bandung*, vol. 13, no. 1, pp. 80–90, Aug. 2021, doi: 10.34011/juriskesbdg.v13i1.1841.
- [32] V. Suryan *et al.*, "Eco Airport Design: Rancangan Gedung Terminal Ramah Lingkungan pada Bandar Udara," *Jurnal Talenta Sipil*, vol. 7, no. 2, p. 759, Aug. 2024, doi: 10.33087/talentasipil.v7i2.583.
- [33] E. Shaffie, R. Hassan, A. K. Arshad, and N. M. Bhkari, *Sustainable Green Infrastructure*. Springer, 2025. [Online]. Available: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-981-96-1486-8.pdf>
- [34] P. R. Suryanto A. and T. Wahyudi, "Circular Economy Implementation in Airport Waste Management: Case Study of Indonesian Airports," *Indonesian Journal of Environmental Management*, vol. 15, no. 2, 2024, [Online]. Available: <https://ejournal.uin-suska.ac.id/index.php/IJEM/article/view/9201>
- [35] S. Reifsnnyder, "Converting HPO to Nitrogen Removal: Closing the Oxygen Gap Through Electrolysis," in *AccessWater Conference*, 2024. [Online]. Available: <https://www.accesswater.org/publications/proceedings/-10116172/convertng-hpo-to-nitrogen-removal-closing-the-oxygen-gap-through-electrolysis>
- [36] M. I. Purnama, M. Hasan Machfoed, and J. E. Wahono, "Association of Early Nutritional Status with the Clinical Severity in Patients with Acute Stroke," *Indian Journal of Forensic Medicine & Toxicology*, vol. 14, no. 2, p. 1799.
- [37] S. Pagliarin and P. Marks, "Airports' Environmental Effects and Limits to Growth: An Integrated Framework," *Journal of Environmental Policy & Planning*, 2025, doi: 10.1080/1523908X.2025.2468271.