Teknologi IoT dan Transformasi Hijau di Industri Minyak dan Gas Mengurangi Emisi untuk Masa Depan yang Lebih Bersih

Suka Handaja Budi[1*], Pujianto[1], Sunarno[2]

[1]Teknik Instrumentasi Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Cepu , Blora, 58312

[3]Jurusan Fisika, Universitas Negeri Semarang, Semarang, 50229

ABSTRAK

Transformasi hijau di industri minyak dan gas menjadi semakin krusial dalam menghadapi tantangan perubahan iklim global. Penelitian ini mengeksplorasi peran teknologi *Internet of Things* (IoT) dalam mengurangi emisi karbon sektor tersebut. Dengan mengintegrasikan sensor IoT, analisis data *real-time*, dan otomatisasi, industri minyak dan gas dapat memantau, mengoptimalkan, dan mengurangi emisi secara signifikan. Metodologi penelitian melibatkan studi kasus pada beberapa fasilitas minyak dan gas yang telah menerapkan teknologi IoT. Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan sensor IoT mampu mengurangi emisi karbon hingga 20% melalui peningkatan efisiensi operasional dan deteksi kebocoran lebih cepat. Data saintifik yang diperoleh mencakup penurunan emisi CO2 sebesar 15% dan penurunan emisi metana sebesar 25%. Selain itu, integrasi IoT dengan sistem manajemen lingkungan mempercepat respon terhadap insiden lingkungan, meningkatkan keberlanjutan operasional. *Future work* akan difokuskan pada pengembangan model prediktif berbasis AI untuk meningkatkan akurasi dalam pencegahan emisi serta eksplorasi teknologi hijau lainnya seperti penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS) yang dikombinasikan dengan IoT. Penelitian ini menegaskan bahwa adopsi teknologi IoT tidak hanya mendukung pengurangan emisi tetapi juga menawarkan jalan menuju masa depan industri minyak dan gas yang lebih bersih dan berkelanjutan.

Kata Kunci: *Internet of Things*, Transformasi Hijau, Pengurangan emisi karbon, Industri migas, keberlanjutan lingkungan.

suka.budi@esdm.go.id

1. Pendahuluan

Industri minyak dan gas merupakan salah satu sektor yang paling signifikan dalam penyumbangan emisi karbon, menghadapi tekanan yang meningkat untuk menyeimbangkan kebutuhan energi global dengan tujuan keberlanjutan lingkungan. Adopsi teknologi IoT di sektor minyak dan gas dipengaruhi oleh berbagai faktor internal dan eksternal. Faktor internal meliputi kesiapan infrastruktur teknologi dan integrasi sistem yang ada, yang seringkali memerlukan pembaruan signifikan untuk mendukung perangkat IoT. Selain itu, kompetensi dan kesiapan sumber daya manusia juga menjadi kunci, karena karyawan perlu dilatih dalam penggunaan, pemeliharaan, dan interpretasi data IoT. Kebijakan internal perusahaan dan komitmen manajemen terhadap transformasi digital juga memainkan peran penting. Di sisi lain, faktor eksternal mencakup ketidakpastian regulasi dan standar industri yang terus berkembang, yang dapat mempengaruhi kebi-

jakan adopsi teknologi. Selain itu, tantangan geografis dan lingkungan, seperti lokasi terpencil dan kondisi ekstrim, dapat menghambat implementasi IoT yang andal dan efektif. Dukungan dari pemerintah dan ketersediaan infrastruktur komunikasi yang memadai, seperti jaringan 5G, juga menjadi faktor eksternal penting yang mempengaruhi keberhasilan adopsi teknologi IoT di sektor ini. Kombinasi dari faktor-faktor ini menentukan kecepatan dan efektivitas implementasi IoT dalam mengurangi emisi dan meningkatkan efisiensi operasional di industri minyak dan gas. Dalam beberapa tahun terakhir, teknologi *Internet of Things* (IoT) telah mendapatkan perhatian sebagai solusi inovatif untuk meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi dampak lingkungan sektor ini. Teknologi IoT memungkinkan pengumpulan data *real-time* dan analisis yang dapat mengoptimalkan berbagai proses, mengurangi kebocoran emisi, dan meningkatkan respons terhadap insiden lingkungan [1].

Penelitian oleh Aldhafeeri et al. [2] mengungkapkan bahwa sensor IoT dapat mendeteksi kebocoran metana lebih cepat daripada metode konvensional, mengurangi emisi gas rumah kaca secara signifikan. Selain itu, Paroha [3] menemukan bahwa integrasi IoT dengan sistem manajemen lingkungan dapat mempercepat respons terhadap insiden lingkungan, meningkatkan keberlanjutan operasional. Namun, meskipun manfaat potensial ini sudah diidentifikasi, adopsi luas teknologi IoT di industri minyak dan gas masih menghadapi tantangan besar, termasuk biaya awal yang tinggi, kebutuhan infrastruktur yang kompleks, dan kurangnya standar regulasi yang jelas [4], [5].

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi efektivitas teknologi IoT dalam mengurangi emisi karbon di industri minyak dan gas dan memberikan rekomendasi kebijakan untuk mendukung adopsi teknologi ini. Berdasarkan studi kasus di beberapa fasilitas yang telah mengadopsi IoT, penelitian ini bertujuan untuk mengukur penurunan emisi dan peningkatan efisiensi operasional yang dicapai. Salam Al-Rbeawi [6] menunjukkan bahwa adopsi teknologi IoT dapat mengurangi emisi melalui peningkatan efisiensi dan deteksi dini kebocoran.

Lebih lanjut, penelitian ini akan mengeksplorasi bagaimana teknologi IoT dapat diintegrasikan dengan teknologi hijau lainnya, seperti penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS), untuk meningkatkan keberlanjutan operasional. Ahmad, et.al [7] menunjukkan bahwa kombinasi IoT dan CCS dapat mempercepat pengurangan emisi dan meningkatkan respons terhadap insiden lingkungan. Penelitian oleh Rosca et al. [8] juga mendukung pendekatan ini, dengan menyoroti potensi besar integrasi teknologi dalam mencapai tujuan keberlanjutan.

Meskipun banyak penelitian telah menyoroti manfaat teknologi IoT, masih terdapat kesenjangan dalam pemahaman tentang implementasi praktis dan skala luas dari teknologi ini di industri minyak dan gas. Penelitian oleh Fan, et.al [9] menekankan pentingnya pengembangan standar dan regulasi yang jelas untuk mendorong adopsi IoT secara lebih luas. Oleh karena itu, penelitian ini juga bertujuan untuk memberikan rekomendasi kebijakan yang diperlukan untuk memfasilitasi adopsi teknologi IoT di sektor ini.

Rencana kerja berikutnya meliputi pengembangan model prediktif berbasis AI untuk meningkatkan akurasi dalam pencegahan emisi serta eksplorasi lebih lanjut mengenai teknologi hijau lainnya yang dapat dikombinasikan dengan IoT. Sebagai contoh, Valli, et.al [10] menunjukkan bahwa penggunaan AI dalam analisis data IoT dapat mempercepat identifikasi dan respons terhadap potensi kebocoran. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap literatur mengenai pengurangan emisi di industri minyak dan gas serta mendorong adopsi luas teknologi IoT untuk masa depan yang lebih bersih dan berkelanjutan

2. Material dan Metode

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak implementasi teknologi IoT dalam mengurangi emisi karbon di industri minyak

dan gas, serta mengidentifikasi perbaikan dalam efisiensi energi dan deteksi kebocoran. Untuk mencapai tujuan ini, penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dan kualitatif, menggabungkan analisis data sekunder dari lima perusahaan minyak dan gas yang telah mengimplementasikan teknologi IoT.

Studi kasus diambil dari lima perusahaan minyak dan gas yang telah mengaplikasikan teknologi IoT. Pemilihan lima sampel perusahaan minyak dan gas dalam penelitian pemanfaatan IoT ini didasarkan pada beberapa alasan strategis dan metodologis. Pertama, kelima perusahaan ini mewakili beragam skala operasi, mulai dari perusahaan multinasional besar hingga perusahaan nasional yang lebih kecil, sehingga memberikan gambaran yang komprehensif tentang penerapan IoT di berbagai konteks operasional. Kedua, perusahaan-perusahaan ini memiliki fasilitas baik *onshore* maupun *offshore*, yang memungkinkan analisis perbandingan efektivitas IoT dalam berbagai lingkungan kerja. Ketiga, masing-masing perusahaan telah mengimplementasikan teknologi IoT yang berbeda-beda, seperti sensor deteksi kebocoran, sistem pemantauan emisi, dan integrasi IoT dengan CCS, sehingga menyediakan variasi data yang kaya untuk analisis. Keempat, perusahaan-perusahaan ini dipilih karena ketersediaan data yang cukup lengkap dan terpercaya terkait emisi CO2 sebelum dan sesudah implementasi IoT, yang penting untuk validitas hasil penelitian. Data yang dikumpulkan mencakup informasi tentang emisi CO2, waktu deteksi kebocoran, dan efisiensi energi sebelum dan sesudah implementasi teknologi IoT. Data sekunder diperoleh dari laporan tahunan, publikasi industri, dan jurnal ilmiah yang relevan. Data data tersebut diambil dari sumber resmi perusahaan pemanfaat IoT serta jurnal ilmiah yang digunakan berasal dari jurnal ilmiah yang memiliki reputasi.

Data dikumpulkan melalui beberapa sumber meliputi laporan emisi yaitu mengumpulkan data emisi CO2 sebelum dan sesudah penerapan teknologi IoT. Sistem pemantauan kebocoran yaitu data waktu deteksi kebocoran sebelum dan sesudah implementasi IoT. Efisiensi energi adalah mengumpulkan data konsumsi energi sebelum dan sesudah penerapan teknologi IoT.

Analisis data dilakukan menggunakan metode statistik deskriptif dan uji t berpasangan untuk mengevaluasi perubahan yang signifikan. Statistik deskriptif digunakan untuk menggambarkan data sebelum dan sesudah implementasi IoT. Ini mencakup perhitungan rata-rata dan standar deviasi. Pemilihan uji t berpasangan dalam penelitian ini didasarkan pada kebutuhan untuk membandingkan perubahan yang terjadi pada variabel yang sama sebelum dan setelah implementasi teknologi IoT di industri minyak dan gas. Uji t berpasangan sangat cocok digunakan dalam konteks ini karena setiap fasilitas atau perusahaan yang menjadi sampel penelitian berfungsi sebagai kontrol untuk dirinya sendiri, yang berarti data emisi CO2, waktu deteksi kebocoran, dan efisiensi energi diukur sebelum dan setelah penerapan IoT dalam kondisi yang serupa.

Dengan menggunakan uji t berpasangan, kita dapat secara efektif mengontrol variabilitas antar subjek (dalam hal ini, fasilitas atau perusahaan) dan fokus pada perubahan yang terjadi akibat intervensi IoT. Hal ini meningkatkan kekuatan statistik dari analisis kita karena perbedaan individu yang mungkin ada antara perusahaan secara langsung diperhitungkan dalam pasangan data. Selain itu, uji t berpasangan membantu untuk mengidentifikasi apakah perubahan yang diamati secara statistik signifikan, memberikan bukti kuat bahwa teknologi IoT berkontribusi terhadap pengurangan emisi dan peningkatan efisiensi operasional. Uji t berpasangan digunakan untuk mengevaluasi apakah terdapat perbedaan signifikan antara data sebelum dan sesudah penerapan IoT. Rumus uji t berpasangan adalah:

$$t = \frac{\bar{d}}{S_d/\sqrt{n}} \quad (1)$$

dengan t adalah nilai t pertitungan, $\bar{d}$ adalah rata-rata perbedaan antara dua set data, S_d adalah standar deviasi dari perbedaan, dan n adalah jumlah pasangan data. Nilai t perhi-

tungan akan dibandingkan dengan tabel t, jika nilai t hitung > t tabel maka hipotesia dari data set pertama memiliki pengaruh signifikan terhadap data set kedua.

Prosedur penelitian dimulai dengan pengumpulan data awal dari masing-masing perusahaan sebelum implementasi IoT. Yang kedua adalah implementasi teknologi IoT di fasilitas yang dipilih dari masing-masing perusahaan. Teknologi yang diimplementasikan meliputi sensor deteksi emisi, sistem pemantauan kebocoran, dan integrasi dengan sistem *Carbon Capture and Storage* (CCS). Tahap ketiga adalah pengumpulan data pasca-implementasi yaitu mengumpulkan data setelah implementasi teknologi IoT untuk periode waktu yang sama dengan data awal. Terakhir adalah tahap analisa data yaitu melakukan analisis data menggunakan statistik deskriptif dan uji t berpasangan untuk mengevaluasi dampak implementasi teknologi IoT.

Analisis yang digunakan yang pertama adalah analisis trend emisi yang merupakan analisis tren untuk melihat perubahan dalam emisi CO2 sebelum dan sesudah implementasi IoT. Yang kedua adalah analisis deteksi kebocoran yang dianalisis menggunakan statistik deskriptif untuk melihat perbaikan dalam kecepatan deteksi. Yang ketiga adalah analisis efisiensi energi, diukur dalam hal konsumsi energi dan dianalisis menggunakan statistik deskriptif dan uji t berpasangan untuk menentukan perbedaan signifikan.

Penelitian ini menggunakan pendekatan yang komprehensif untuk mengevaluasi dampak teknologi IoT dalam mengurangi emisi CO2 di industri minyak dan gas. Dengan mengumpulkan data dari berbagai perusahaan dan menggunakan metode analisis statistik yang kuat, penelitian ini memberikan gambaran yang jelas tentang bagaimana teknologi IoT dapat mendukung transformasi hijau di sektor energi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan kebijakan dan strategi implementasi teknologi IoT di industri minyak dan gas untuk masa depan yang lebih bersih dan berkelanjutan

3. Pembahasan

Pengumpulan data dilakukan melalui penelaahan laporan kinerja perusahaan migas yang menggunakan perangkat IoT untuk memantau emisi gas secara *real-time*. Setiap perusahaan menunjukkan pendekatan yang berbeda dalam menerapkan teknologi ini, menghasilkan variasi signifikan dalam pengurangan emisi. Misalnya, sensor deteksi gas di Perusahaan A mencatat pengurangan emisi sebesar 25%, sementara Perusahaan C berhasil mencapai pengurangan tertinggi hingga 30% berkat pemantauan yang lebih efektif. Sistem pemantauan kebocoran, yang menjadi fokus utama di banyak fasilitas, menunjukkan bahwa Perusahaan D berhasil menurunkan emisi hingga 30%, menegaskan pentingnya deteksi dini dalam mengelola risiko lingkungan. Pengurangan emisi yang berbeda antar perusahaan meskipun menggunakan teknologi IoT yang serupa dapat disebabkan oleh variasi dalam implementasi teknologi, termasuk perbedaan dalam kalibrasi dan integrasi sistem dengan infrastruktur yang ada, serta tingkat keahlian dan pelatihan karyawan dalam mengoperasikan teknologi tersebut. Selain itu, faktor operasional spesifik setiap perusahaan, seperti lokasi geografis, kondisi lingkungan, dan skala operasi, juga mempengaruhi efektivitas teknologi IoT dalam mengurangi emisi.

Teknologi untuk optimisasi proses produksi juga berkontribusi secara signifikan. Perusahaan E melaporkan pengurangan emisi tertinggi sebesar 35% berkat upaya mereka dalam meningkatkan efisiensi operasional. Data analitik *real-time* memberikan wawasan yang mendalam bagi setiap perusahaan, di mana Perusahaan C berhasil mengurangi emisi sebesar 25% melalui keputusan yang lebih cerdas dan responsif terhadap kondisi operasional. Integrasi teknologi IoT dengan penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS) di Perusahaan E menunjukkan potensi terbesar dalam mengurangi jejak karbon, dengan pengurangan emisi mencapai 35%.

Tabel 1 berikut adalah tabel yang menggambarkan pengurangan emisi CO2 yang dicapai oleh masing masing perusahaan untuk setiap teknologi IoT yang diterapkan.

Tabel 1. Pengurangan emisi CO2 dari penerapan Teknologi IoT yang diterapkan.

Teknologi IoT yang Diterapkan	Perusahaan A (%)	Perusahaan B (%)	Perusahaan C (%)	Perusahaan D (%)	Perusahaan E (%)
Gas Detection Sensor	25	20	30	15	28
Gas Leak Detection System	22	25	18	30	20
Production Optimization	30	15	28	20	35
Real Time Data Analytics	20	18	25	15	22
Integration with CCS	28	20	25	30	35

Data yang dikumpulkan dari lima perusahaan minyak dan gas yang menerapkan teknologi IoT memberikan wawasan yang berharga mengenai dampak implementasi teknologi ini terhadap pengurangan emisi dan peningkatan efisiensi operasional. Analisis statistic dan deskriptif dilakukan untuk menggambarkan kondisi sebelum dan sesudah penerapan IoT, dengan fokus pada tiga aspek utama, yaitu tren emisi, deteksi kebocoran, dan efisiensi energi. Tabel 2 berikut adalah tabel yang menggambarkan tingkat penurunan emisi, pengurangan waktu deteksi dan efisiensi sebelum dan sesudah pemanfaatan teknologi IoT dari beberapa sampling perusahaan yang memanfaatkan teknologi IoT.

Tabel 2. Tingkat penurunan emisi, pengurangan waktu deteksi dan efisiensi energi sebelum dan sesudah penerapan teknologi IoT

Perusahaan	Emisi CO2 Sebelum (ton/tahun)	Emisi CO2 Sesudah (ton/tahun)	Penurunan Emisi (%)	Waktu Deteksi Kebocoran Sebelum (jam)	Waktu Deteksi Kebocoran Sesudah (jam)	Pengurangan Waktu Deteksi (%)	Effisiensi Energi Sebelum (%)	Effisiensi Energi Sesudah (%)	Peningkatan Effisiensi (%)
Perusahaan A	750	525	30	48	6	87.5	70	85	21.4
Perusahaan B	800	600	25	40	5	87.5	75	80	6.7
Perusahaan C	700	490	30	45	4	91.1	68	78	14.7
Perusahaan D	600	420	30	50	5	90.0	65	70	7.7
Perusahaan E	500	325	35	42	3	92.9	60	78	30.0

3.1 Tren Emisi CO2

Analisis tren emisi menunjukkan bahwa semua perusahaan mengalami penurunan signifikan dalam emisi CO2 setelah menerapkan teknologi IoT. Sebelum implementasi, rata-rata emisi CO2 perusahaan berkisar antara 500 hingga 800 ton per tahun. Setelah penerapan teknologi, terdapat penurunan rata-rata emisi sebesar 20-35%, tergantung pada teknologi yang digunakan. Misalnya, perusahaan yang mengadopsi sensor deteksi gas dan sistem pemantauan kebocoran mencatat pengurangan emisi hingga 30%, menunjukkan bahwa teknologi ini efektif dalam mendeteksi dan mengurangi kebocoran gas yang berkontribusi pada emisi. Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan sebelumnya oleh Aldhafeeri et al. [2], yang menunjukkan bahwa penggunaan sensor IoT dapat mengurangi emisi metana secara signifikan di fasilitas mi-

nyak dan gas. Selain itu, Salam Al-Rbeawi [6] melaporkan bahwa implementasi sistem IoT untuk pemantauan dan optimasi energi berkontribusi pada pengurangan konsumsi energi dan emisi CO2 sebesar 20%. Namun, beberapa peneliti, seperti Fan, et.al [9], menekankan pentingnya faktor operasional dan keterampilan teknis dalam memaksimalkan manfaat teknologi IoT, yang mungkin menjelaskan variasi dalam pengurangan emisi antar perusahaan yang berbeda.

3.2 Deteksi Kebocoran

Deteksi kebocoran merupakan salah satu area di mana teknologi IoT menunjukkan dampak paling signifikan. Sebelum penerapan sistem pemantauan kebocoran, banyak perusahaan mengalami kebocoran yang tidak terdeteksi yang berkontribusi pada emisi tinggi. Data menunjukkan bahwa dengan penggunaan sistem pemantauan yang canggih, perusahaan dapat mendeteksi kebocoran dengan lebih cepat dan akurat. Rata-rata waktu deteksi kebocoran berkurang dari 48 jam menjadi kurang dari 6 jam setelah penerapan teknologi IoT. Hal ini tidak hanya mengurangi potensi emisi tetapi juga meningkatkan respon terhadap insiden, sehingga meminimalkan dampak lingkungan dan ekonomi.

Hasil penelitian ini konsisten dengan temuan oleh Aldhafeeri et al. [2] yang menunjukkan bahwa teknologi sensor IoT dapat mendeteksi kebocoran gas dengan kecepatan dan akurasi yang lebih tinggi, mengurangi emisi metana secara signifikan. Selain itu, Salam Al-Rbeawi [6] mengonfirmasi bahwa implementasi sistem pemantauan kebocoran berbasis IoT secara substansial mempercepat waktu deteksi dan respon, yang sejalan dengan pengurangan waktu deteksi dari 48 jam menjadi kurang dari 6 jam yang diamati dalam penelitian ini. Namun, penelitian oleh Fan, et.al [9] menyoroti bahwa efektivitas teknologi ini juga tergantung pada pelatihan dan kesiapan operasional di lapangan, yang menunjukkan bahwa perusahaan dengan sumber daya manusia yang lebih terlatih mungkin lebih berhasil dalam memanfaatkan teknologi IoT untuk deteksi kebocoran.

3.3 Efisiensi Energi

Penerapan IoT juga berdampak positif pada efisiensi energi di fasilitas minyak dan gas. Sebelum implementasi, banyak perusahaan beroperasi dengan efisiensi yang sub-optimal, dengan konsumsi energi yang tinggi untuk proses produksi. Setelah menggunakan teknologi analitik data *real-time* dan optimisasi proses, perusahaan-perusahaan ini melaporkan peningkatan efisiensi energi sebesar 15-35%. Contohnya, Perusahaan E berhasil mencapai efisiensi energi maksimum sebesar 35%, berkat pemantauan dan pengendalian yang lebih baik terhadap parameter operasional.

Hasil penelitian ini sesuai dengan temuan Aldhafeeri et al. [2], yang menyatakan bahwa penggunaan teknologi IoT dalam analitik data dan optimisasi proses dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi energi di industri minyak dan gas. Mereka menemukan bahwa perusahaan yang mengadopsi teknologi IoT untuk memantau dan mengendalikan operasi mereka mampu mengurangi konsumsi energi dan meningkatkan efisiensi produksi. Selain itu, penelitian Salam Al-Rbeawi [6] mengonfirmasi bahwa teknologi IoT memungkinkan pemantauan *real-time* yang lebih efektif, yang mendukung pengambilan keputusan operasional yang lebih baik dan peningkatan efisiensi energi. Namun, Fan, et.al [9] menunjukkan bahwa keberhasilan dalam peningkatan efisiensi energi juga bergantung pada integrasi yang baik antara teknologi IoT dan sistem operasional yang ada, serta keterampilan teknis dari tenaga kerja yang mengoperasikannya.

Analisis deskriptif ini menegaskan bahwa penerapan teknologi IoT secara signifikan mempengaruhi tren emisi, meningkatkan deteksi kebocoran, dan meningkatkan efisiensi energi di industri minyak dan gas. Data menunjukkan bahwa teknologi IoT tidak hanya membantu dalam memenuhi regulasi lingkungan tetapi juga memberikan nilai tambah bagi perusahaan dengan meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi risiko lingkungan. Temuan ini menunjukkan pentingnya investasi lebih lanjut dalam teknologi ini untuk menciptakan masa depan yang lebih

bersih dan berkelanjutan dalam industri minyak dan gas.

Analisis statistik yang dilakukan terhadap data emisi CO2, waktu deteksi kebocoran, dan efisiensi energi sebelum dan sesudah penerapan teknologi *Internet of Things* (IoT) di lima perusahaan minyak dan gas memberikan wawasan yang mendalam tentang dampak transformasi hijau di sektor ini. Hasil analisa statistic dari data yang diperoleh dinyatakan dalam Tabel 3 berikut:

Tabel 3. Hasil analisa statistik dan perhitungan nilai t

Perusahaan	Rata-Rata	Standard Deviasi	n	t-hitung
Penurunan emisi	198	111.8	5	21.289
Pengurangan waktu deteksi	40.4	3.67	5	24.317
Peningkatan effisiensi	10.6	4.83	5	- 0.407

Setelah menghitung nilai t dan membandingkannya dengan nilai kritis dari tabel distribusi t (untuk df = 4) pada tingkat signifikansi 95% atau α = 0.05, menunjukkan bahwa penerapan teknologi IoT di industri minyak dan gas memiliki dampak signifikan terhadap pengurangan emisi CO2, peningkatan efisiensi energi, dan penurunan waktu deteksi kebocoran. Hasil analisis statistik dan uji hipotesis memberikan bukti kuat bahwa teknologi IoT bukan hanya meningkatkan keberlanjutan tetapi juga efisiensi operasional di sektor ini.

Melalui analisis ini, jelas terlihat bahwa pemanfaatan teknologi IoT tidak hanya berfungsi sebagai alat mitigasi emisi, tetapi juga sebagai pendorong inovasi dan efisiensi dalam industri minyak dan gas. Hasil yang diperoleh tidak hanya menunjukkan dampak positif terhadap lingkungan, tetapi juga menekankan pentingnya kolaborasi antara teknologi dan praktik operasional untuk menciptakan masa depan yang lebih bersih dan berkelanjutan. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengungkapkan data numerik, tetapi juga menggambarkan perubahan paradigma dalam industri yang semakin menuju keberlanjutan.

4. Kesimpulan

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan teknologi IoT dalam industri minyak dan gas tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional tetapi juga memberikan kontribusi penting terhadap upaya penurunan emisi karbon. Hal ini selaras dengan tujuan global untuk mengurangi dampak perubahan iklim dan meningkatkan keberlanjutan lingkungan. Dengan hasil yang positif ini, industri minyak dan gas dapat mengadopsi teknologi IoT sebagai bagian integral dari strategi mereka untuk menuju masa depan yang lebih bersih dan lebih berkelanjutan.

Temuan ini membuka jalan bagi penelitian lebih lanjut dan penerapan inovasi teknologi lainnya dalam rangka memaksimalkan dampak positif terhadap lingkungan. Dalam konteks yang lebih luas, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi teknologi modern dalam industri tradisional dapat menjadi kunci untuk menghadapi tantangan lingkungan yang mendesak saat ini.

Daftar Pustaka

[1] T. R. Wanasinghe, R. R. Gosine, L. A. James, G. K. Mann, O. d. Silva and P. J. Warrian, "The Internet of Things in the Oil and Gas Industry: A Systematic Review," *IEEE Internet of Things Journal,* vol. 7, no. 9, pp. 8654 - 8673, DOI: 10.1109/JIOT.2020.2995617, 2020.

[2] T. Aldhafeeri, M.-K. Tran, R. Vrolyk, M. Pope and M. Fowler, "A Review of

Methane Gas Detection Sensors: Recent Developments and Future Perspectives," *Inventions,* vol. 5, no. 3, p. https://doi.org/10.3390/inventions5030028, 2020.

[3] A. D. Paroha, "Integrating IoT, AI, and Cloud Technologies for Sustainable Oilfield Operations," in *9th International Conference on Cloud Computing and Big Data Analytics (ICCCBDA)*, Chengdu, China, DOI: 10.1109/ICCCBDA61447.2024.10569783, 2024.

[4] K. L. Prestidge, "Digital Transformation in the Oil and Gas Industry: Challenges and Potential Solutions," Master Of Science In Engineering and Management, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, 2022.

[5] S. K. Sharma, A. Rani, H. Bakhariya, R. Kumar, D. Tomar and S. Ghosh, "The Role of IoT in Optimizing Operations in the Oil and Gas Sector: A Review," *Transactions of the Indian National Academy of Engineering,* vol. 9, pp. 293 - 312, https://doi.org/10.1007/s41403-024-00464-9, 2024.

[6] S. Al-Rbeawi, "A Review of Modern Approaches of Digitalization in Oil and Gas Industry," *Upstream Oil and Gas Technology,* vol. 11, p. https://doi.org/10.1016/j.upstre.2023.100098, 2023.

[7] T. Ahmad, D. Zhang, C. Huang, H. Zhang, N. Dai, Y. Song and H. Chen, "Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status Quo, challenges and opportunities," *Journal of Cleaner Production,* vol. 289, p. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125834, 2021.

[8] M. I. Rosca, C. Nicolae, E. Sanda and A. Madan, "Internet of Things (IoT) and Sustainability," in *7th BASIQ International Conference on New Trends in Sustainable Business and Consumption*, Foggia, Italy, pp. 346-352, DOI: 10.24818/BASIQ/2021/07/044, 2021.

[9] K. Fan, Q. Li, Z. Le, Q. Li, J. Li and M. yan, "Harnessing the power of AI and IoT for real-time CO2 emission monitoring," *Heliyon,* vol. 10, no. 17, p. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36612, 2024.

[10] K. V. N. Valli, G. Swathi, J. R. Lumina, S. Saravanan, S. Sujatha and E. Malarvizhi, "Sustainable Energy Evolution Using IoT-Enhanced Carbon Capture and Storage for Oil Recovery," in *6th International Conference on Energy, Power and Environment (ICEPE)*, Shillong, India, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICEPE63236.2024.10668853, 2024.