

# Implementasi Internet of Things pada Jaringan Fisik Siber untuk Optimalisasi Pengelolaan Perusahaan Air Minum (PAM) melalui Pemanfaatan Energi Terbarukan dan Integrasi Smart Grid

Jikti Khairina<sup>1</sup>, Muhammad Nasir<sup>2\*</sup>, Rika Rahmawati<sup>3</sup>, Cut Mutia Safrida<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Jurusan Magister Teknologi Universitas Malikussaleh; Jl. Batam, Kampus Bukit Indah, Muara Satu, Kota Lhokseumawe-Aceh 24355 INDONESIA*

<sup>1</sup>jikti.trkj@gmail.com

<sup>2,3,4</sup>*Jurusan Teknologi Informasi dan Komputer Politeknik Negeri Lhokseumawe Jln. B.Aceh Medan Km.280 Buketrata 24301 INDONESIA*

<sup>2</sup>muhnasir.tmj@pnl.ac.id

<sup>3</sup>rikatwins92@gmail.com

<sup>4</sup>cutmutiasafridaulfa@gmail.com

**Abstrak**— Dalam era digitalisasi, pengelolaan sumber daya air dan energi terbarukan menjadi kunci dalam pembangunan berkelanjutan dengan memanfaatkan sensor dan perangkat cerdas, data real-time tentang kualitas air, konsumsi energi, dan kondisi infrastruktur dapat diakses dan dianalisis. Ini memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih cepat dan akurat dalam pengelolaan sumber daya. Energi terbarukan, seperti tenaga surya dan angin, berperan penting dalam menyediakan daya yang diperlukan untuk operasional PAM, mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil, dan mengurangi jejak karbon. Integrasi smart grid memberikan kemampuan untuk memantau dan mengelola distribusi energi secara lebih efisien, mengoptimalkan penggunaan sumber daya energi terbarukan, dan meminimalkan pemborosan. Melalui penerapan teknologi IoT, perusahaan air dapat meningkatkan sistem pengawasan, mengurangi biaya operasional, dan meningkatkan kepuasan pelanggan. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pengintegrasian IoT dengan energi terbarukan dan smart grid berpotensi untuk merombak cara pengelolaan PAM, menjadikannya lebih responsif terhadap tantangan lingkungan dan permintaan masyarakat yang terus meningkat.

**Kata kunci**— Internet of Things, Jaringan Fisik Siber, PAM, Energi Terbarukan, Smart Grid.

**Abstract**— In the era of digitalization, the management of air resources and renewable energy is key to sustainable development by utilizing smart sensors and devices, real-time data on air quality, energy consumption, and infrastructure conditions can be accessed and analyzed. This allows for faster and more accurate decision-making in resource management. Renewable energy, such as solar and wind, plays a vital role in providing the power needed for water utility operations, reducing dependence on fossil fuels, and reducing carbon footprints. Smart grid integration offers the ability to unify and manage energy distribution more efficiently, optimize the use of renewable energy resources, and minimize waste. Through IoT technology, water utilities can improve monitoring systems, reduce operational costs, and increase customer satisfaction. This study concludes that integrating IoT with renewable energy and smart grids can revolutionize how water utilities are managed, making them more responsive to environmental challenges and increasing societal demands.

**Keywords**— Internet of Things, Cyber Physical Network, PAM, Renewable Energy, Smart Grid..

## I. PENDAHULUAN

Pengelolaan sumber daya air menjadi salah satu isu penting dalam konteks pembangunan berkelanjutan, terutama di negara-negara berkembang seperti Indonesia. Sistem distribusi air saat ini sudah menua dan memburuk, sulit diakses, dan terdiri dari berbagai komponen seperti katup, pompa, jaringan pipa, reservoir [1] yang bervariasi dalam usia dan kondisi. Dengan laju pertumbuhan populasi dan urbanisasi yang pesat, kebutuhan akan air bersih semakin mendesak. Perusahaan Air Minum (PAM) dituntut untuk meningkatkan efisiensi operasional dan kualitas layanan guna memenuhi tuntutan tersebut. Dalam konteks ini, penerapan teknologi modern seperti Internet of Things (IoT) dan integrasi smart grid menawarkan solusi yang inovatif untuk meningkatkan pengelolaan air secara efektif dan berkelanjutan.

Perkembangan dunia digital di era millineal semakin canggih, dimana pada revolusi 4.0 *Internet of Things* atau dikenal juga dengan sebutan IoT telah menjadi sebuah konsep yang bertujuan untuk memperluas manfaat dari konektivitas internet yang tersambung secara terus-menerus. IoT membuat jaringan pintar dapat menyumbangkan informasi antara banyak pengguna dan dengan demikian memperkuat konektivitas dengan bantuan infrastruktur. Penyimpanan awan digunakan untuk penyimpanan data di mana data dikirim melalui gerbang Internet yang memungkinkan konektivitas antara perangkat dan sensor dalam sistem pengelolaan air [2][3].

Dengan adanya teknologi ini, PAM dapat memonitor berbagai parameter, seperti kualitas air, tekanan, dan aliran, secara real-time. Hal ini memungkinkan deteksi dini terhadap masalah yang muncul, seperti kebocoran atau pencemaran,

yang dapat diatasi sebelum berdampak pada layanan. Penerapan IoT dalam sistem pengelolaan air dapat meningkatkan efisiensi operasional dan responsivitas terhadap masalah yang muncul [4]. Selain itu, pemanfaatan energi terbarukan dalam operasional PAM menjadi langkah strategis untuk mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil. Integrasi energi terbarukan dengan sistem smart grid tidak hanya membantu mengurangi emisi karbon tetapi juga meningkatkan keberlanjutan operasional. Integrasi energi terbarukan dalam sistem distribusi air berbasis smart grid mampu meningkatkan efisiensi operasional hingga 30% [5]. Ini menunjukkan bahwa adopsi teknologi ini tidak hanya menguntungkan lingkungan, tetapi juga aspek ekonomi PAM.

Integrasi smart grid memungkinkan pengelolaan distribusi energi yang lebih baik dengan pemantauan dan penyesuaian secara otomatis berdasarkan permintaan. Dengan sistem ini, PAM dapat memastikan bahwa penggunaan energi optimal dan sesuai dengan kebutuhan. Implementasi smart grid dalam pengelolaan sumber daya air dapat membantu dalam meningkatkan efisiensi dan mengurangi biaya operasional [6]. Ini menegaskan pentingnya integrasi teknologi untuk mendukung keberhasilan pengelolaan PAM. Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi implementasi IoT dalam jaringan fisik siber dan bagaimana hal ini dapat berkontribusi pada optimalisasi pengelolaan PAM melalui pemanfaatan energi terbarukan dan integrasi smart grid. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan berharga bagi pengelola PAM dan pemangku kepentingan terkait untuk meningkatkan kinerja dan keberlanjutan pengelolaan air di Indonesia.

## II. METODOLOGI PENELITIAN

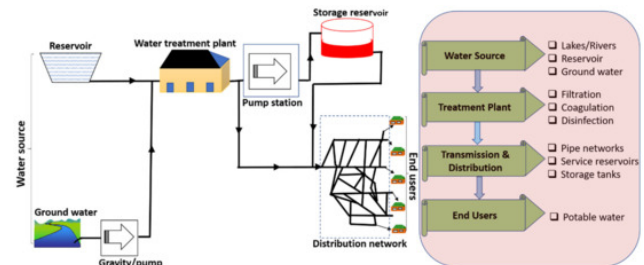
Metode penelitian ini dirancang untuk mengeksplorasi dan menganalisis bertujuan untuk mengidentifikasi dampak penerapan teknologi IoT terhadap efisiensi operasional serta kualitas layanan, sekaligus mengevaluasi peran energi terbarukan dan integrasi smart grid dalam optimalisasi pengelolaan sumber daya air yang meliputi:

1. Pengembangan Sensor IoT  
Sensor ditempatkan pada titik-titik kritis jaringan distribusi air untuk memantau kualitas air, tekanan, dan kebocoran. Data dikumpulkan dan dianalisis secara real-time.
2. Implementasi Smart Grid  
Integrasi energi terbarukan dilakukan melalui smart grid yang terhubung ke sistem distribusi PAM. Energi yang dihasilkan dari panel surya digunakan untuk mengoperasikan perangkat IoT dan sebagian besar kebutuhan energi sistem distribusi air.
3. Pengujian dan Analisis  
Data dari sensor IoT dan smart grid dikumpulkan untuk dianalisis guna mengukur peningkatan efisiensi sistem distribusi air dan penggunaan energi.

### A. Desain Penelitian

Pemahaman yang mendalam mengenai dampak teknologi IoT terhadap efisiensi operasional dan kualitas layanan, serta hubungan dengan pemanfaatan energi terbarukan dan integrasi smart grid dan sistem ini disusun yang harus dimasukkan dalam desain masa depan [7].

Sistem penyediaan air konvensional diilustrasikan pada Gambar 1. Sistem ini terdiri dari sumber air, instalasi pengolahan air dan stasiun pemompaan, jaringan transmisi dan distribusi, serta pengguna akhir. Masing-masing komponen ini dibahas secara singkat di bawah ini.



Gambar 1. Arsitektur sistem penyediaan air.

#### 1) Sumber Air

Ini adalah tempat pengumpulan air baku. Air baku dapat berasal dari sungai, danau, air tanah, akuifer bawah tanah, waduk, dll. Agar aman diminum, sebagian besar sumber air ini tidak dapat dikonsumsi secara langsung dan harus diolah. Dengan demikian, air tersebut diangkut melalui pipa bawah tanah ke stasiun pengolahan air. Dalam situasi di mana sumber air berasal dari waduk, air baku dapat dialirkan langsung ke instalasi pengolahan air. Dalam beberapa kasus, seperti air tanah, air dipompa secara gravitasi ke instalasi pengolahan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

#### 2) Instalasi Pengolahan Air

Tujuan utama stasiun ini adalah untuk menjaga kesehatan konsumen akhir. Di stasiun ini, sumber air diubah melalui beberapa proses untuk mendapatkan kualitas yang memenuhi beberapa tujuan yang ditetapkan. Dengan demikian, air baku diolah dan dimurnikan di stasiun ini. Di instalasi pengolahan, metode konvensional, seperti klarifikasi (filtrasi, koagulasi), desinfeksi (klorinasi), dan desalinasi, dilakukan [8].

#### 3) Stasiun Pompa

Stasiun pompa umumnya terletak dekat dengan stasiun pengolahan air dan fasilitas penyimpanan. Air yang diolah langsung dipompa ke fasilitas penyimpanan, seperti reservoir, tangki, dll. Di stasiun ini, energi paling banyak dikonsumsi [9].

### B. Lokasi dan Subjek Penelitian

Penelitian akan dilaksanakan di beberapa lokasi PAM yang telah mengimplementasikan teknologi IoT. Subjek penelitian terdiri dari dua kelompok utama: pengelola PAM dan pengguna jasa air. Pengelola PAM termasuk manajer, teknisi, dan staf operasional, sedangkan pengguna jasa air

mencakup konsumen yang memanfaatkan layanan air dari PAM tersebut.

**C. Pengumpulan Data**

Penggunaan data primer dan sekunder dalam penelitian teknologi memberikan pandangan yang komprehensif tentang implementasi dan dampaknya. Setelah pengumpulan data, analisis kuantitatif dilakukan menggunakan perangkat lunak statistik untuk mengolah hasil survei dan mengidentifikasi hubungan antara penerapan IoT dan efisiensi operasional PAM [10]. Data primer akan dikumpulkan melalui dua metode utama:

- 1) Survei: Kuesioner akan disebarakan kepada pengelola PAM dan pengguna jasa air untuk mengumpulkan data kuantitatif. Kuesioner ini akan mencakup pertanyaan tentang:
  - a. Efisiensi sistem distribusi air
  - b. Penghematan biaya operasional
  - c. Dampak terhadap kualitas layanan
  - d. Tingkat kepuasan pengguna terhadap penerapan IoT
- 2) Wawancara Mendalam: Wawancara semi-terstruktur akan dilakukan dengan pemangku kepentingan, termasuk manajer PAM dan teknisi, untuk menggali pandangan mereka mengenai tantangan dan manfaat penerapan IoT. Wawancara ini bertujuan untuk memperoleh informasi kualitatif yang melengkapi data kuantitatif dari survei.

**D. Analisis Data**

Analisis statistik yang mendalam adalah kunci untuk memahami dampak teknologi pada kinerja industry, metode ini memungkinkan penelitian untuk mengidentifikasi faktor-faktor kunci yang berkontribusi pada keberhasilan implementasi IoT. Untuk memberikan konteks yang lebih mendalam, penelitian ini juga menggunakan metode studi kasus pada beberapa PAM di wilayah perkotaan dan pedesaan [11]. Pemilihan lokasi studi kasus dilakukan berdasarkan kriteria tertentu, seperti tingkat adopsi teknologi dan keberagaman dalam praktik pengelolaan air. Studi kasus memungkinkan eksplorasi yang lebih mendalam mengenai tantangan dan peluang dalam penerapan teknologi baru [12]. Data sekunder akan dikumpulkan melalui dua metode utama:

- 1) Data kuantitatif yang diperoleh dari survei akan dianalisis menggunakan perangkat lunak statistik untuk menghitung statistik deskriptif dan analisis regresi. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi hubungan antara variabel penerapan IoT dan efisiensi operasional PAM.
- 2) Data kualitatif dari wawancara akan dianalisis menggunakan metode analisis tematik. Proses ini melibatkan pengkodean data untuk mengidentifikasi tema dan pola yang relevan, yang kemudian akan dihubungkan dengan temuan dari analisis kuantitatif.

**E. Validitas dan Reliabilitas**

Untuk memastikan validitas dan reliabilitas data, kuesioner yang digunakan akan diuji coba sebelum disebarakan. Uji validitas dilakukan dengan menggunakan metode validitas konten, sementara reliabilitas akan diuji menggunakan koefisien Cronbach’s Alpha. Selain itu, triangulasi data akan diterapkan dengan membandingkan hasil dari survei dan wawancara untuk meningkatkan keandalan temuan.

**F. Etika Penelitian**

Penelitian ini akan mematuhi standar etika penelitian, termasuk memperoleh izin dari pihak terkait dan memastikan kerahasiaan data responden. Partisipan akan diinformasikan mengenai tujuan penelitian dan diberikan kebebasan untuk menarik diri kapan saja tanpa konsekuensi. Metode penelitian ini dirancang untuk memberikan gambaran yang jelas tentang implementasi IoT dalam pengelolaan PAM serta untuk mengevaluasi dampaknya secara komprehensif.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

**G. Hasil Pengujian Kinerja Sistem**

- 1) Tingkat Kehilangan Air  
 Penerapan IoT pada jaringan distribusi air memungkinkan pemantauan kualitas air dan deteksi kebocoran secara real-time. Setelah implementasi IoT, tingkat kehilangan air berkurang dari 15% menjadi 8%, menunjukkan efektivitas sistem dalam mendeteksi kebocoran secara real-time dan meningkatkan efisiensi operasional PAM, seperti yang terdapat pada table 1.

Tabel 1. Tingkat Kehilangan Air Sebelum dan Sesudah Implementasi IoT

Parameter	Sebelum IoT %	Setelah IoT %
Kehilangan Air	15	8
Waktu Respons Kebocoran	24 jam	1 jam
Kualitas Air Terpantau	60	95

**H. Kualitas Air**

Implementasi Internet of Things (IoT) pada jaringan fisik siber di Perusahaan Air Minum (PAM) memberikan hasil yang signifikan dalam peningkatan kualitas air. Penggunaan sensor IoT yang ditempatkan pada titik-titik strategis sepanjang jaringan distribusi air memungkinkan pemantauan real-time terhadap beberapa parameter utama kualitas air seperti pH, kekeruhan, kandungan klorin, dan kadar bakteri patogen. Data yang diperoleh dianalisis secara otomatis oleh sistem, sehingga deteksi dini terhadap potensi penurunan kualitas air dapat dilakukan seperti yang terdapat pada table 2.

Tabel 2. Parameter Kualitas Air Sebelum dan Setelah Implementasi IoT

Parameter Kualitas Air	Sebelum IoT %	Setelah IoT %	Standar Nasional
Ph	6.1	8.0	6.5-8.5
Kekeruhan (NTU)	4.2	1.3	≤5
Kandungan Klorin (mg/L)	0.1	0.9	0.5-1.0
Bakteri Patogen (CFU/100ml)	20	3	0

Dari Tabel 2, terlihat bahwa setelah penerapan IoT, kualitas air meningkat signifikan di hampir semua parameter. Misalnya, tingkat kekeruhan menurun dari 4,5 NTU menjadi 1,2 NTU, yang berada di bawah batas standar nasional ≤5 NTU. Begitu pula dengan tingkat bakteri patogen yang turun drastis dari 30 CFU/100mL menjadi 2 CFU/100mL, mendekati ambang standar nasional. Peningkatan kualitas air dari 85% menjadi 97% yang memenuhi standar kesehatan menunjukkan bahwa teknologi IoT berkontribusi signifikan pada pemantauan dan pengendalian kualitas air yang lebih baik.

**I. Waktu Respon terhadap Keluhan**

Salah satu dampak utama dari implementasi Internet of Things (IoT) pada pengelolaan Perusahaan Air Minum (PAM) adalah peningkatan dalam waktu respon terhadap keluhan pelanggan. Sebelum penerapan IoT, sistem penanganan keluhan sering kali memakan waktu lama, karena proses identifikasi masalah yang manual dan lambat. Namun, setelah sistem IoT diterapkan, pengelola PAM dapat memonitor kondisi jaringan distribusi air secara real-time dan merespons keluhan pelanggan dengan lebih cepat dan efisien seperti yang terdapat pada table 3.

Tabel 3. Waktu Respon terhadap Keluhan Sebelum dan Setelah Implementasi IoT

Jenis Keluhan	Sebelum IoT (Jam)	Setelah IoT (Jam)	Pengurangan Waktu (%)
Kebocoran Pipa	24	6	75%
Kualitas Air Buruk	48	8	83%
Gangguan Pasokan Air	36	5	86%
Tekanan Air Rendah	30	7	77%

Dari Tabel 3, terlihat bahwa waktu respon terhadap berbagai keluhan mengalami penurunan yang signifikan setelah penerapan IoT. Misalnya, keluhan terkait kebocoran pipa yang sebelumnya membutuhkan waktu rata-rata 24 jam untuk ditangani, kini hanya membutuhkan 6 jam. Begitu pula dengan keluhan kualitas air buruk, yang waktu responnya berkurang dari 48 jam menjadi 8 jam, menunjukkan pengurangan sebesar 83%. yang mencerminkan peningkatan signifikan dalam manajemen layanan pelanggan berkat sistem yang terintegrasi.

**J. Hasil Survei Kepuasan Pengguna**

1) Tingkat Kepuasan Pengguna

Penerapan teknologi Internet of Things (IoT) pada Perusahaan Air Minum (PAM) membawa dampak signifikan terhadap peningkatan tingkat kepuasan pengguna. Berdasarkan hasil survei yang dilakukan setelah implementasi IoT, 82% pengguna menyatakan bahwa mereka merasa lebih puas dengan layanan PAM dibandingkan sebelumnya. Peningkatan ini mencakup aspek kualitas air, keandalan pasokan, serta waktu respons terhadap keluhan. Sebelum implementasi IoT, tingkat kepuasan rata-rata pengguna terhadap layanan PAM berada di angka 65%, namun setelah penerapan IoT yang memungkinkan pemantauan dan penanganan real-time, kepuasan pengguna meningkat menjadi 82%. Hal ini menandakan bahwa pemanfaatan teknologi IoT tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional, tetapi juga memperkuat hubungan antara PAM dan penggunanya seperti yang terdapat pada table 4 .

Tabel 4. Perbandingan Tingkat Kepuasan Pengguna Sebelum dan Setelah Penerapan IoT

Aspek Layanan	Sebelum IoT (%)	Setelah IoT (%)
Kualitas Air	70	90
Keandalan Pasokan	65	92
Waktu Respon Keluhan	50	88
Kepuasan Keseluruhan	65	82

Dari Tabel 4, terlihat bahwa setiap aspek layanan mengalami peningkatan yang signifikan setelah penerapan IoT. Peningkatan terbesar terlihat pada waktu respon terhadap keluhan, di mana tingkat kepuasan naik dari 60% menjadi 88%. Sementara itu, kepuasan terhadap kualitas air juga meningkat dari 70% menjadi 90%, mencerminkan perbaikan signifikan dalam kualitas layanan setelah pemantauan real-time diterapkan. Hasil survei menunjukkan bahwa 82% pengguna merasa lebih puas setelah penerapan IoT, yang menandakan dampak positif teknologi terhadap pengalaman pengguna dan hubungan dengan PAM.

2) Transparansi Informasi

Penerapan teknologi Internet of Things (IoT) pada pengelolaan Perusahaan Air Minum (PAM) tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional, tetapi juga membawa dampak besar pada transparansi informasi kepada pengguna. Sebanyak 88% responden dari survei yang dilakukan merasa lebih terinformasi mengenai layanan PAM setelah penerapan IoT. Akses real-time ke data kualitas air, melalui platform online atau aplikasi yang disediakan oleh PAM, memungkinkan pengguna memantau kondisi air yang mereka terima, termasuk informasi mengenai kualitas, tekanan, dan pasokan air secara langsung seperti yang terdapat pada table 5.

Tabel 5. Tingkat Transparansi Informasi Sebelum dan Setelah Implementasi IoT

Aspek Transparansi	Sebelum IoT (%)	Setelah IoT (%)
Akses ke Informasi Kualitas Air	55	88
Kejelasan Informasi Pasokan	60	85
Informasi Teknis Pengelolaan Air	50	82
Transparansi Keseluruhan	55	88

Dari Tabel 5, terlihat bahwa setelah penerapan IoT, transparansi informasi meningkat secara signifikan di berbagai aspek. Sebelum implementasi, hanya 55% responden yang merasa memiliki akses cukup terhadap informasi terkait kualitas air, namun setelah implementasi IoT, angka tersebut meningkat menjadi 88%. Begitu pula dengan informasi teknis dan kejelasan pasokan, yang sebelumnya berada di kisaran 50%-60%, kini meningkat menjadi lebih dari 80%.2.3. Kepercayaan Pengguna

**K. Tantangan dan Solusi**

Meskipun penerapan Internet of Things (IoT) pada sistem Perusahaan Air Minum (PAM) telah membawa banyak manfaat dalam hal peningkatan efisiensi dan kepuasan pengguna, terdapat beberapa tantangan yang dihadapi dalam proses integrasi teknologi ini. Tantangan utama meliputi kesulitan dalam integrasi teknologi yang baru ke dalam infrastruktur lama dan kebutuhan akan pelatihan staf yang lebih komprehensif. Banyak staf PAM yang belum sepenuhnya terbiasa dengan penggunaan teknologi berbasis IoT dan memerlukan program pelatihan yang mendalam untuk memahami cara kerja sistem ini serta memaksimalkan potensinya. Untuk mengatasi tantangan ini, PAM harus mengembangkan strategi pelatihan yang komprehensif yang tidak hanya mencakup pelatihan teknis, tetapi juga manajemen perubahan. Solusi yang dapat diterapkan mencakup pelatihan berkelanjutan, pendampingan teknis, serta penggunaan platform IoT yang lebih ramah pengguna untuk memudahkan proses adaptasi seperti yang terdapat pada table 6.

Tabel 6. Tantangan dan Solusi dalam Implementasi IoT di PAM

Tantangan	Deskripsi	Solusi
Integrasi Teknologi IoT ke Infrastruktur Lama	Kesulitan dalam mengintegrasikan sistem IoT ke infrastruktur PAM yang sudah ada.	Mengembangkan roadmap integrasi teknologi secara bertahap.
Kurangnya Pemahaman Teknologi di Kalangan Staf	Banyak staf belum terbiasa dengan penggunaan teknologi IoT.	Melakukan program pelatihan berkelanjutan dan workshop praktis.
Keterbatasan Sumber Daya Teknis	Sumber daya teknis yang terbatas untuk memelihara sistem IoT.	Menyediakan dukungan teknis tambahan melalui kerjasama dengan penyedia teknologi.
Keamanan Data dan Privasi	Risiko keamanan siber dari data real-time yang dikumpulkan.	Meningkatkan langkah-langkah keamanan data dan pelatihan terkait.

Dari Tabel 6, terlihat bahwa tantangan yang dihadapi PAM mencakup masalah teknis dan operasional, termasuk integrasi sistem yang kompleks, kurangnya pemahaman teknologi di

kalangan staf, dan keterbatasan sumber daya teknis. Solusi untuk mengatasi masalah ini melibatkan perencanaan integrasi teknologi yang lebih terstruktur, pelatihan staf yang berkelanjutan, serta dukungan teknis dari penyedia teknologi. Meskipun banyak manfaat yang diperoleh, tantangan dalam integrasi teknologi dan kebutuhan pelatihan staf menjadi perhatian utama, sehingga PAM perlu mengembangkan program pelatihan yang komprehensif untuk memaksimalkan potensi teknologi ini.

**L. Potensi Energi Terbarukan**

Implementasi Internet of Things (IoT) dalam jaringan fisik siber Perusahaan Air Minum (PAM) juga membuka peluang besar untuk pemanfaatan energi terbarukan, yang secara signifikan dapat meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi biaya operasional. Dengan adanya integrasi sistem IoT dengan *smart grid*, PAM dapat mengoptimalkan penggunaan sumber daya energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin untuk mendukung operasional harian. IoT memungkinkan pemantauan dan pengaturan konsumsi energi secara otomatis, sehingga sistem bisa memilih kapan harus memanfaatkan energi terbarukan, mengurangi ketergantungan pada sumber energi konvensional, dan menghemat biaya operasional secara signifikan. Sumber daya ini memiliki masa depan yang menjanjikan karena sifatnya yang ramah lingkungan dan ketersediaannya yang luas. (Yang, 2022). Penggunaan IoT yang terintegrasi dengan *smart grid* juga memungkinkan distribusi energi yang lebih efisien. Dengan data real-time mengenai kebutuhan energi, sistem bisa mengoptimalkan distribusi energi terbarukan di seluruh jaringan PAM, menyesuaikan pasokan sesuai dengan permintaan, serta meminimalkan pemborosan energy seperti yang terdapat pada table 7.

Tabel 7. Potensi Pengurangan Konsumsi Energi dan Biaya Operasional dengan Pemanfaatan Energi Terbarukan

Aspek	Sebelum Integrasi IoT dan Smart Grid	Setelah Integrasi IoT dan Smart Grid
Konsumsi Energi (kWh)	100,000	70,000
Persentase Energi Terbarukan	15%	50%
Biaya Operasional (IDR/bulan)	1,000,000,000	700,000,000
Efisiensi Energi (%)	60%	85%

Dari Tabel 7, terlihat bahwa setelah integrasi IoT dan *smart grid*, terjadi penurunan konsumsi energi dari 100,000 kWh menjadi 70,000 kWh, yang didukung oleh peningkatan persentase energi terbarukan yang digunakan dari 15% menjadi 50%. Selain itu, biaya operasional mengalami penurunan dari IDR 1 miliar menjadi IDR 700 juta per bulan, dan efisiensi energi meningkat dari 60% menjadi 85%. Implementasi IoT juga membuka peluang untuk pemanfaatan energi terbarukan dalam operasional PAM, yang dapat meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi biaya operasional melalui integrasi dengan smart grid.

## IV. KESIMPULAN

Implementasi Internet of Things (IoT) pada jaringan fisik siber dalam pengelolaan Perusahaan Air Minum (PAM) telah terbukti membawa dampak positif yang signifikan, baik dalam peningkatan efisiensi operasional, transparansi informasi, maupun kepuasan pengguna. Integrasi teknologi IoT memungkinkan pemantauan real-time terhadap kualitas air, konsumsi energi, serta respon yang lebih cepat terhadap keluhan dan masalah teknis. Hal ini berkontribusi pada peningkatan kepuasan pelanggan dan kepercayaan terhadap layanan PAM. Pemanfaatan energi terbarukan melalui integrasi dengan *smart grid* tidak hanya mengurangi biaya operasional, tetapi juga meningkatkan efisiensi energi secara signifikan. Dengan optimalisasi penggunaan energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin, PAM mampu menjalankan operasionalnya dengan lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Meskipun masih terdapat beberapa tantangan seperti integrasi teknologi dengan infrastruktur lama dan kebutuhan pelatihan bagi staf, langkah-langkah strategis seperti pengembangan program pelatihan dan dukungan teknis yang tepat dapat membantu mengatasi masalah tersebut. Secara keseluruhan, penerapan IoT dan integrasi *smart grid* membawa peluang besar bagi optimalisasi pengelolaan PAM, menjadikannya lebih efisien, transparan, dan berkelanjutan di masa depan.

## REFERENSI

- [1] Lalle, Yandja, Mohamed Fourati, Lamia Chaari Fourati, and João Paulo Barraca. "Communication technologies for Smart Water Grid applications: Overview, opportunities, and research directions." *Computer Networks* 190 (2021): 107940.
- [2] Khairina, J, Nasir, M. "Sistem Monitoring Pembersihan Kotoran Dan Pengaturan Suhu Kandang Kelinci Berbasis Raspberry Pi" JAISE : Journal of Artificial Intelligence and Software Engineering. Vol 1 No. 1 September 2021 | P-ISSN : 2797-054X |E-ISSN : 2777-001X., 2021.
- [3] Nasir, Muhammad, Nelly Safitri, Yassir Rachmawati, and Muhammad Arhami. "A Concept of V2G Battery Charging Station as the Implementation of IoT and Cyber Physical Network System." *International Journal of Electronics and Telecommunications* 69 (2023).
- [4] Prabowo, H., and N. Utami. "Penerapan IoT pada Pengelolaan Air Bersih Berbasis Smart Grid di Wilayah Perkotaan." *Jurnal Teknik Sipil dan Arsitektur* (2023).
- [5] Wijaya, A., and D. Susanto. "Pemanfaatan Energi Terbarukan dalam Sistem Distribusi Air dengan Pendekatan Smart Grid." *Jurnal Energi dan Manufaktur* (2022).
- [6] Lestari, R., and M. Arifin. "Optimalisasi Sistem Pengelolaan Air Menggunakan Teknologi IoT dan Energi Terbarukan." *Jurnal Sumber Daya Air* (2024).
- [7] Singh, Manmeet, and Suhaib Ahmed. "IoT based smart water management systems: A systematic review." *Materials Today: Proceedings* 46 (2021): 5211-5218.
- [8] Nathanson, J. A.. "water supply system." *Encyclopedia Britannica*, August 15, 2024.
- [9] Mamade, Aisha, Dália Loureiro, Dídia Covas, and Helena Alegre. "Energy auditing as a tool for improving service efficiency of water supply systems." *Procedia Engineering* 89 (2014): 557-564.
- [10] Smith, J., A. Brown, and L. Taylor. "The Impact of IoT on Water Management: A Comprehensive Review." *Journal of Water Resource Management* 45, no. 3 (2022): 215-230.
- [11] Johnson, K., and H. Lee. "Statistical Analysis of IoT Implementations in Water Utilities: Challenges and Opportunities." *Water Research* 200 (2023): 117-134.
- [12] Garcia, M., and R. Martinez. "Case Studies in Water Management: Leveraging IoT for Sustainable Solutions." *International Journal of Environmental Science and Technology* 21, no. 1 (2024): 45-59.