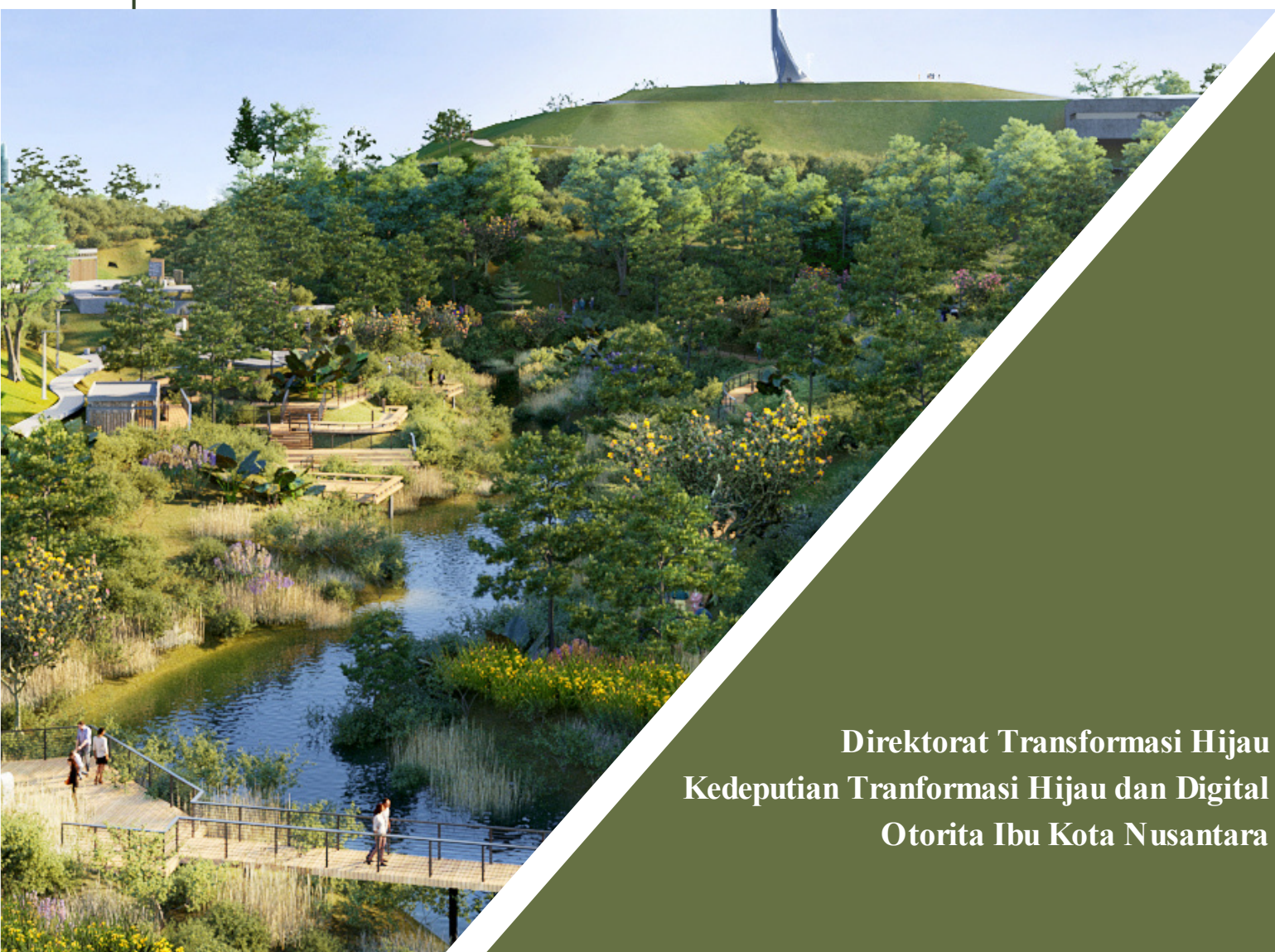




Pedoman Teknis *Smart Water & Smart Wastewater Management:*

**Pemanfaatan Teknologi Cerdas dalam Pengelolaan Air
Bersih dan Air Limbah Untuk Ibu Kota Nusantara**



**Direktorat Transformasi Hijau
Kedeputan Tranformasi Hijau dan Digital
Otorita Ibu Kota Nusantara**



Penasihat Utama

Prof. (H.C.) Ir. Bambang Susantono, MCP., MSCE., Ph.D.

Kepala Otorita Ibu Kota Nusantara

Prof. Ir. Mohammed Ali Berawi, M.Eng.Sc., Ph.D.

Deputi Transformasi Hijau dan Digital

Penanggung Jawab

Agus Gunawan, ST., M.Eng.

Direktur Transformasi Hijau

Penulis & Kontributor

Direktorat Transformasi Hijau

Toha Saleh, S.T., M.Sc.

Zafya Nadhira Affiandi, S.T., M.T.

Nur Allya Widiaputri, S.Ars.

Putri Amalia Sholichah, S.T.

Faris Puspongoro, S.T., M.T.

Linggar Rengga Alridho, S.T.

Sekar Dwijayanti, S.T.

Dimas Raihan Alghifary S.T

Ignasius Mario Septianta Nugraha S.T., M.T.

UP2M Teknik Sipil dan Lingkungan Universitas Indonesia

Dr. R. M. Sandyanto Adityosulindro, S.T., M.T., M.Sc.

Dr. Ir. Tomy Abuzairi, S.T., M.T., M.Sc, Ph.D

Iftita Rahmatika, S.T., M.Eng., Ph.D

Dr.-Ing. Sucipta Laksono, S.T., M.T.

Shafira Budiningsih S.T., M.T.

Rafi Muhammad S.T.

Abdillah Winata S.T.

Tata Letak

Teno Sulistyanto, S.Si.

Raden Elsa Nurmandhini, S.Kel.



KATA PENGANTAR



Pedoman ini merupakan hasil kajian yang telah diselenggarakan oleh Kedeputusan Transformasi Hijau dan Digital up. Direktorat Tansformasi Hijau, bersama Tim UP2M Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Hasil kajian ini kemudian dijadikan sebagai dokumen pedoman dalam pengelolaan secara cerdas air minum dan air limbah dengan menggunakan teknologi di Ibu Kota Nusantara.

Pengelolaan secara cerdas dalam pedoman ini adalah penerapan teknologi SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) dalam pemantauan kualitas air minum dan air limbah. Pemantauan tersebut dengan menggunakan sensor yang dipasang pada Instalasi Pengolahan Air, Instalasi Pengolahan Air Limbah, Jaringan Distribusi dan Transmisi serta daur ulang pemanfaatan air hujan. Data real time yang dicatat oleh sensor dikirimkan ke Command Center dan Data Center OIKN, untuk kemudian diambil keputusan terkait bagian dari pengelolaannya.

Dalam pedoman ini juga menyajikan 2 alternatif rekomendasi yang dijabarkan dalam tahapan jangka pendek atau kondisi minimum dan jangka panjang atau kondisi optimum serta rekomendasi tindak lanjut hasil deteksi sensor yang terintegrasi dengan sistem intervensi otomatis untuk mewujudkan sistem pengolahan air cerdas dan berkelanjutan. Dalam penyusunan pedoman ini, tim kajian telah melibatkan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, Bappenas dan Pemerintah Daerah Kalimantan Timur untuk mendapatkan saran dan masukan. Diharapkan dengan adanya pedoman ini, dapat digunakan sebagai pegangan dalam pengelolaan secara cerdas air minum dan air limbah di Ibu Kota Nusantara utamanya dalam pencapaian KPI 4 (Rendah Emisi Karbon) dan KPI 5 (Sirkular dan Tangguh).

Prof. Mohammed Ali Berawi, M.Eng.Sc., Ph.D.

Deputi Transformasi Hijau dan Digital

KATA PENGANTAR

Penyediaan air bersih yang siap minum dan pengelolaan air limbah yang cerdas, menjadi tantangan bagi Direktorat Transformasi Hijau untuk melakukan kajian bersama Tim UI dalam menghasilkan pedoman ini. Meskipun infrastruktur untuk penyediaan air bersih dan air limbah dibangun oleh Kementerian PUPR, tetapi untuk pemilihan teknologi yang sesuai dengan Nusantara sebagai Kota Cerdas disediakan oleh Direktorat Transformasi Hijau. Adapun teknologi tersebut berupa pemilihan sensor-sensor yang akan dipasangkan sejak dari bendungan, intake, reservoir, jaringan transmisi, jaringan distribusi dan sampai dengan pelanggan.



Dalam melakukan kajian pada teknologi terkini dilaksanakan perbandingan pada teknologi yang telah diterapkan pada kota cerdas lainnya di dunia. Sehingga penerapannya di Nusantara akan menjadikannya sebanding dengan kota dunia lainnya, dimana air bersih sudah siap minum, dan air limbah dapat dikelola dengan baik dan dapat digunakan ulang untuk keperluan lainnya. Pengelolaan air limbah yang benar akan menghemat penggunaan air bersih, dan mendukung pembangunan rendah karbon.

Pengelolaan air hujan di IKN juga dianggap penting, karena beberapa bagian wilayah di IKN mengalami kesulitan air pada musim kemarau. Dengan pengelolaan yang cerdas ini, maka air hujan akan dapat dipanen dan dimanfaatkan pada saat musim kemarau.

Sosialisasi pengelolaan air bersih dan air limbah secara cerdas sebagaimana tertuang pada Pedoman Teknis Smart Water & Wastewater Management akan terus dilakukan oleh Direktorat Transformasi Hijau kepada seluruh pemangku kepentingan. Diharapkan juga, pedoman teknis ini menjadi referensi dalam pengambilan keputusan terkait, baik dalam lingkup IKN maupun di luar IKN. Penyediaan informasi berkaitan dengan pedoman teknis ini, akan disediakan oleh Direktorat Transformasi Hijau.

Agus Gunawan, S.T., M.Eng.
Direktur Transformasi Hijau

The background of the top half of the page is a photograph of a park. On the right, a tall flagpole stands on a grassy hill, flying the Indonesian national flag. To the left, a modern building with a distinctive, angular roof is visible through the trees. The sky is clear and blue.

EXECUTIVE SUMMARY

Smart Water and Smart Wastewater Management:

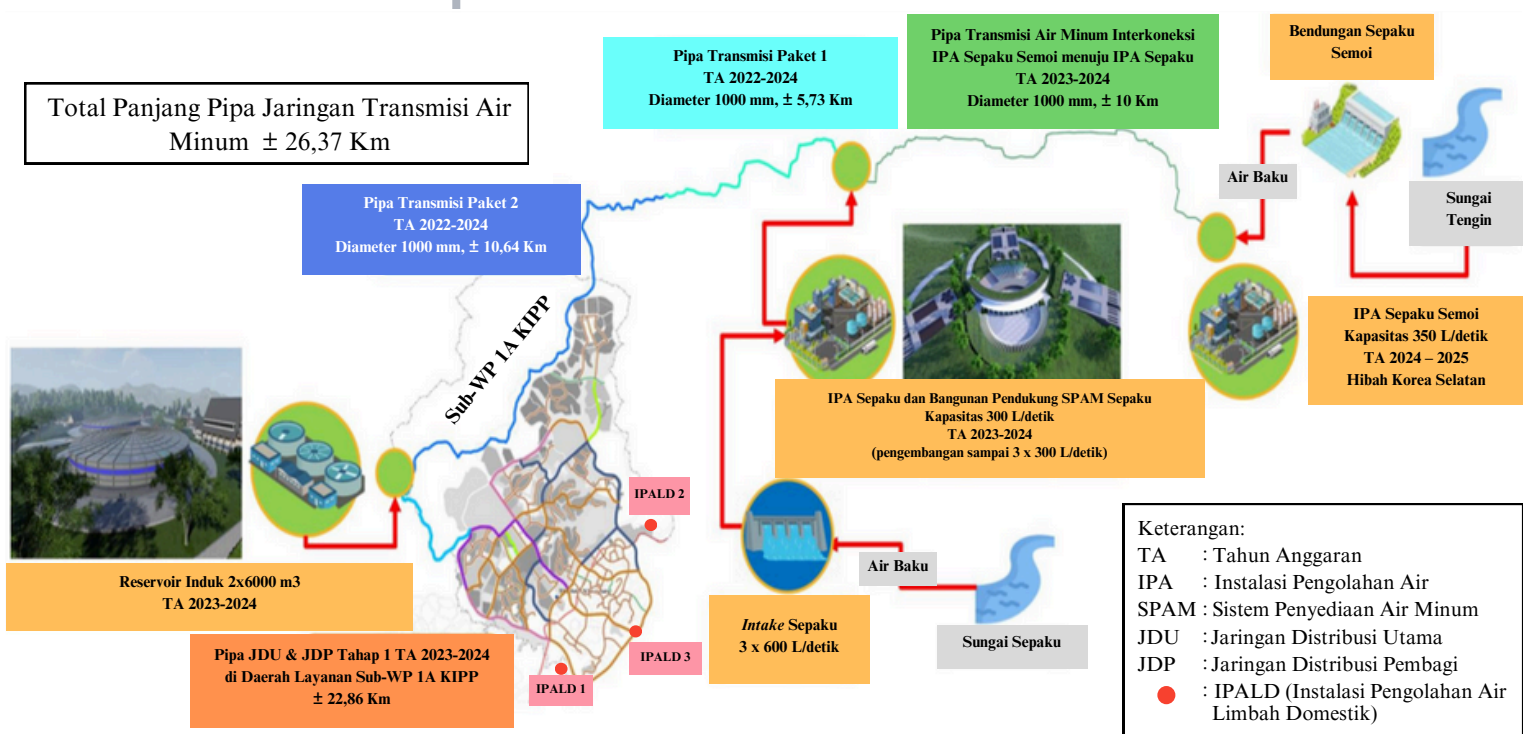
Pemanfaatan Teknologi Cerdas dalam
Pengelolaan Air Bersih dan Air Limbah Untuk
Ibu Kota Nusantara

The bottom half of the page features a photograph of a park area. A wooden walkway with a metal railing runs along a body of water. The water is surrounded by lush greenery, including tall reeds and various plants. In the background, a few people can be seen walking on the path.

**Kedeputan Transformasi Hijau dan Digital
Otorita Ibu Kota Nusantara**

Pemanfaatan teknologi cerdas dalam pengelolaan air di Ibu Kota Nusantara (IKN) dibedakan peruntukkannya untuk air bersih dan air limbah. Teknologi cerdas dalam pengelolaan air bersih dapat diterapkan pada bangunan dan infrastruktur air bersih berupa bendungan, *intake*, Instalasi Pengolahan Air (IPA), jaringan transmisi, serta jaringan distribusi. Teknologi cerdas dalam pengelolaan air limbah khususnya air limbah domestik *greywater*, dapat diterapkan pada Instalasi Pengolahan Air Limbah Domestik (IPALD) serta pada bangunan-bangunan gedung yang ada di IKN.

Ilustrasi lokasi IPA, jaringan transmisi, jaringan distribusi, serta IPALD sebagai bangunan dan infrastruktur eksisting untuk mendukung pengelolaan air bagi Wilayah Perencanaan Kawasan Inti Pusat Pemerintahan (KIPP), khususnya Sub-WP 1A KIPP dapat dilihat pada **Gambar 1**.

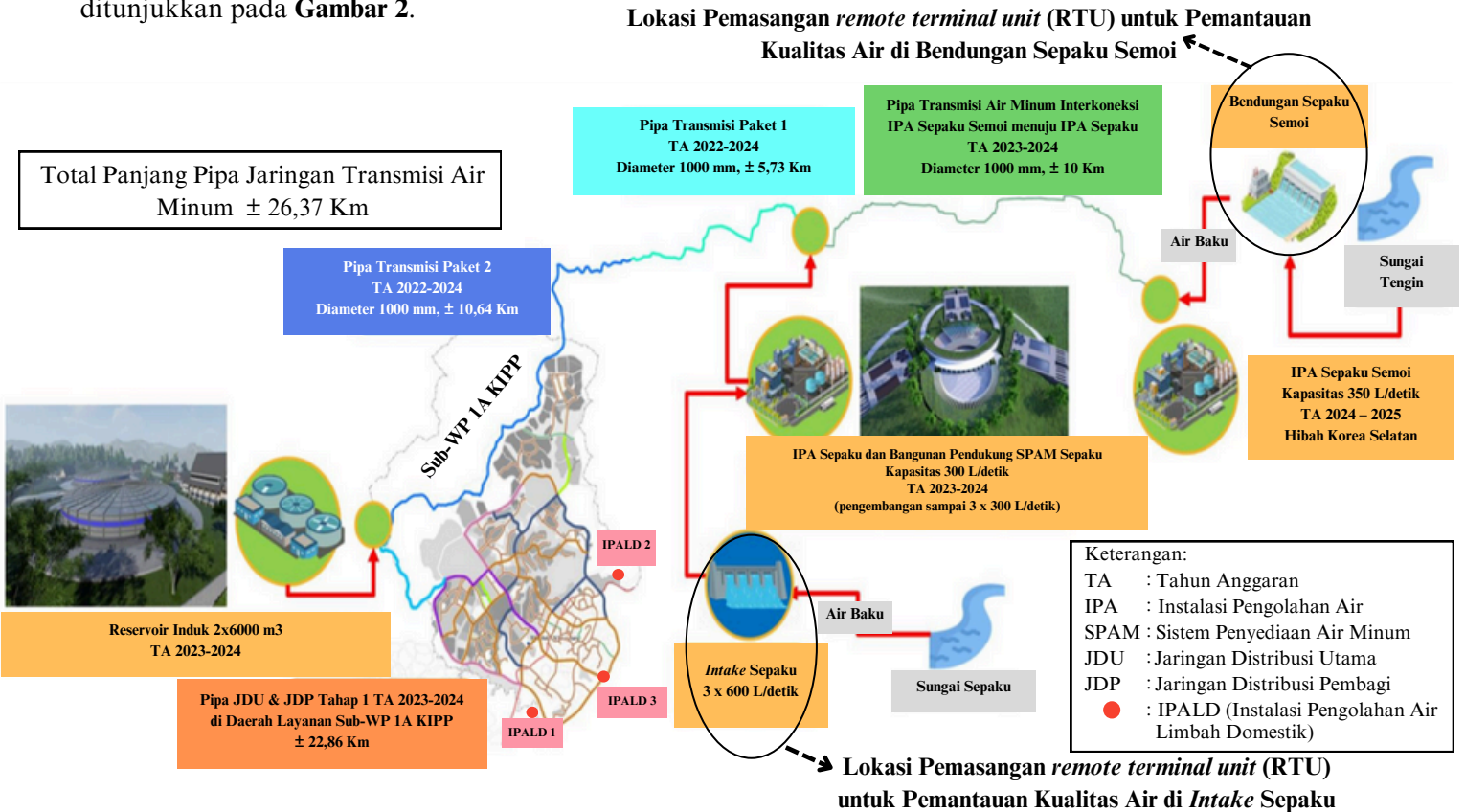


Gambar 1. Lokasi IPA, Jaringan Transmisi, Jaringan Distribusi, serta IPALD untuk Kebutuhan Sub-WP 1A KIPP IKN (sumber: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat atau PUPR, 2022)

Bangunan dan infrastruktur air yang terlihat pada **Gambar 1** dibangun oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR). Tiga bangunan air utama yang mendukung suplai air bersih adalah IPA Sepaku Semoi, IPA Sepaku, dan reservoir induk. Untuk mendukung implementasi *smart water & wastewater management* pada bangunan dan infrastruktur air tersebut, diperlukan peran teknologi yang dibahas mendetail pada penjelasan berikut.

Teknologi untuk Pemantauan Kualitas Sungai (*River Quality Monitoring*)

Teknologi yang digunakan untuk pemantauan kualitas sungai adalah sistem *online monitoring* dengan *remote terminal unit* (RTU) yang terdiri dari *multiprobe sensor*, *smart data logger*, serta komponen sumber energi. *Multiprobe sensor* dapat mendeteksi beragam parameter kualitas air, seperti kandungan amonia, *Biological Oxygen Demand* (BOD), *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Dissolved Oxygen* (DO), Nitrat, *Potential of Hydrogen* atau pH (derajat keasaman), *Total Dissolve Solid* (TDS), dan *Total Suspended Solid* (TSS). Parameter ini mengacu pada Baku Mutu Air Kelas I yang termuat dalam PP Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Ilustrasi lokasi pemasangan RTU ditunjukkan pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Rekomendasi Lokasi Pemasangan *Remote Terminal Unit* (RTU) Pemantauan Kualitas Air Sungai (ditandai lingkaran hitam) (sumber: adaptasi dari Kementerian PUPR, 2022)

Penjelasan lebih lanjut mengenai komponen *remote terminal unit* (RTU) sebagai pendukung teknologi pemantauan kualitas sungai termuat pada **Tabel 1** berikut.

Tabel 1. Komponen *Remote Terminal Unit* (RTU)

Rekomendasi Lokasi (berdasarkan Gambar 2)	Komponen RTU yang Dipasang	Fungsi
<ul style="list-style-type: none"> Bendungan Sepaku Semoi Intake Sepaku 	<i>Multiprobe sensor</i>	Sebagai sistem pengukuran sampel air (parameter BOD, COD, DO, pH, suhu air, TSS, TDS, ammonia, dan tinggi muka air)
	<i>Smart data logger</i>	Sebagai sistem pengendali pemantauan kualitas air untuk lokasi <i>remote area</i> atau <i>data logger</i> berbasis komputer sebagai sistem pengendali pemantauan kualitas air
	Komponen sumber energi yang terdiri dari panel surya, aki kering, solar cell controller, dan pembatas arus	Sebagai sistem kelistrikan perangkat <i>remote terminal unit</i> (RTU)

Teknologi untuk Bangunan Instalasi Pengolahan Air (IPA)

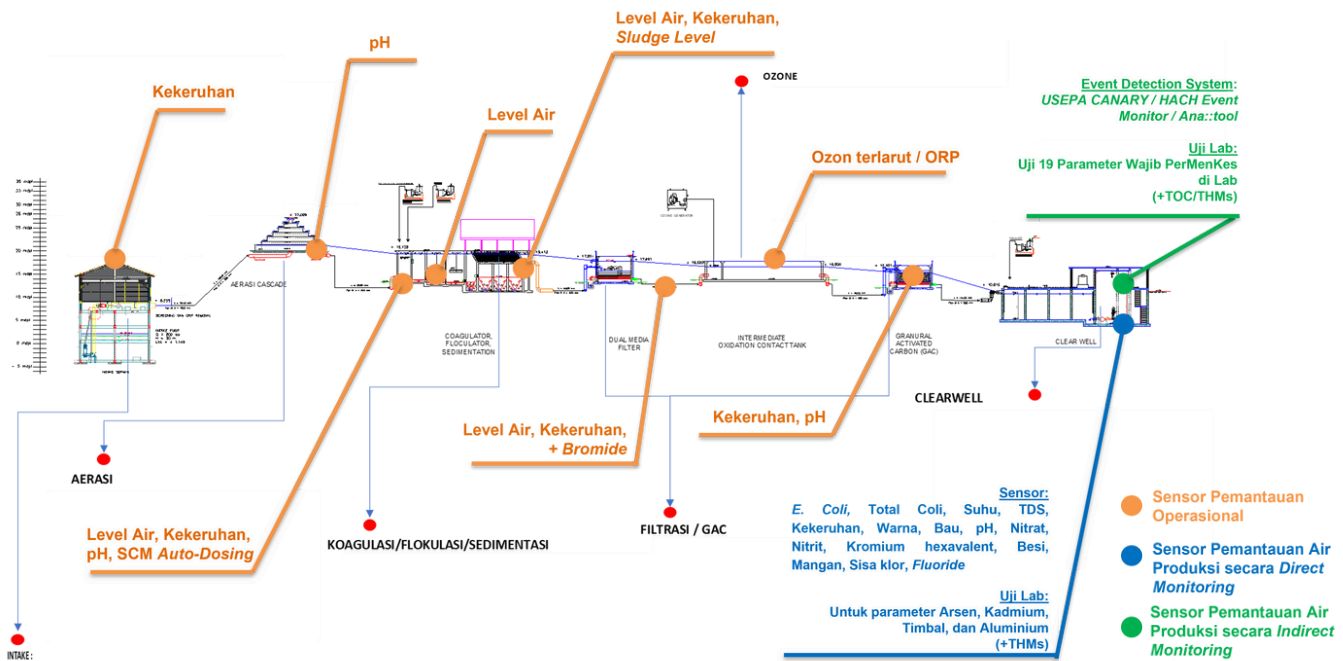
Teknologi yang diterapkan pada IPA yaitu teknologi sistem *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA), yang merupakan teknologi monitoring, visualisasi, dan kontrol operasional dalam berbagai industri. Sistem SCADA secara luas diimplementasikan pada proses pengolahan air dan sistem jaringan distribusi atau perpipaan air. Selain SCADA, digunakan juga *smart sensor* untuk mendeteksi 15 dari 19 parameter wajib kualitas air produksi yang termuat pada:

1. PermenKes Nomor 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan, dan
2. PerMenPUPR Nomor 26 Tahun 2014 tentang Prosedur Operasional Standar Pengelolaan Sistem Penyediaan Air Minum.

Teknologi SCADA dan *smart sensor* digunakan untuk mendukung pemantauan kualitas air yang berupa **pemantauan operasional** dan **pemantauan kualitas air produksi**.

Gambar 3 menampilkan ilustrasi rekomendasi penerapan *smart sensor* pada unit IPA IKN berdasarkan parameter yang diukur. Rekomendasi penerapan *smart sensor* dibagi menjadi 2, yaitu:

1. **Rekomendasi *direct monitoring***, yaitu rekomendasi sistem *smart sensor* yang menekankan pada pemantauan hampir seluruh parameter kualitas air produksi yang diatur dalam PermenKes Nomor 2 Tahun 2023. Komponen *direct monitoring* terdiri dari sensor pemantauan operasional dan sensor pemantauan air produksi.
2. **Rekomendasi *indirect monitoring***, yaitu rekomendasi sistem *smart sensor* yang berperan sebagai *event detection system* (EDS). EDS yaitu suatu sistem deteksi berbagai kontaminan yang berdasarkan pada anomali konsentrasi parameter sensitif (seperti residu klor, *total organic carbon* atau TOC, pH, dan konduktivitas) terhadap *baseline* konsentrasi, yang dikombinasikan dengan sistem kecerdasan buatan. Komponen *indirect monitoring* terdiri dari sensor pemantauan operasional dan EDS.



Gambar 3. Rekomendasi Lokasi Pemasangan Sensor dan Perangkat Pendukung pada unit IPA IKN (sumber: adaptasi dari bagan sistem penyediaan air minum Sepaku Kementerian PUPR, 2022)

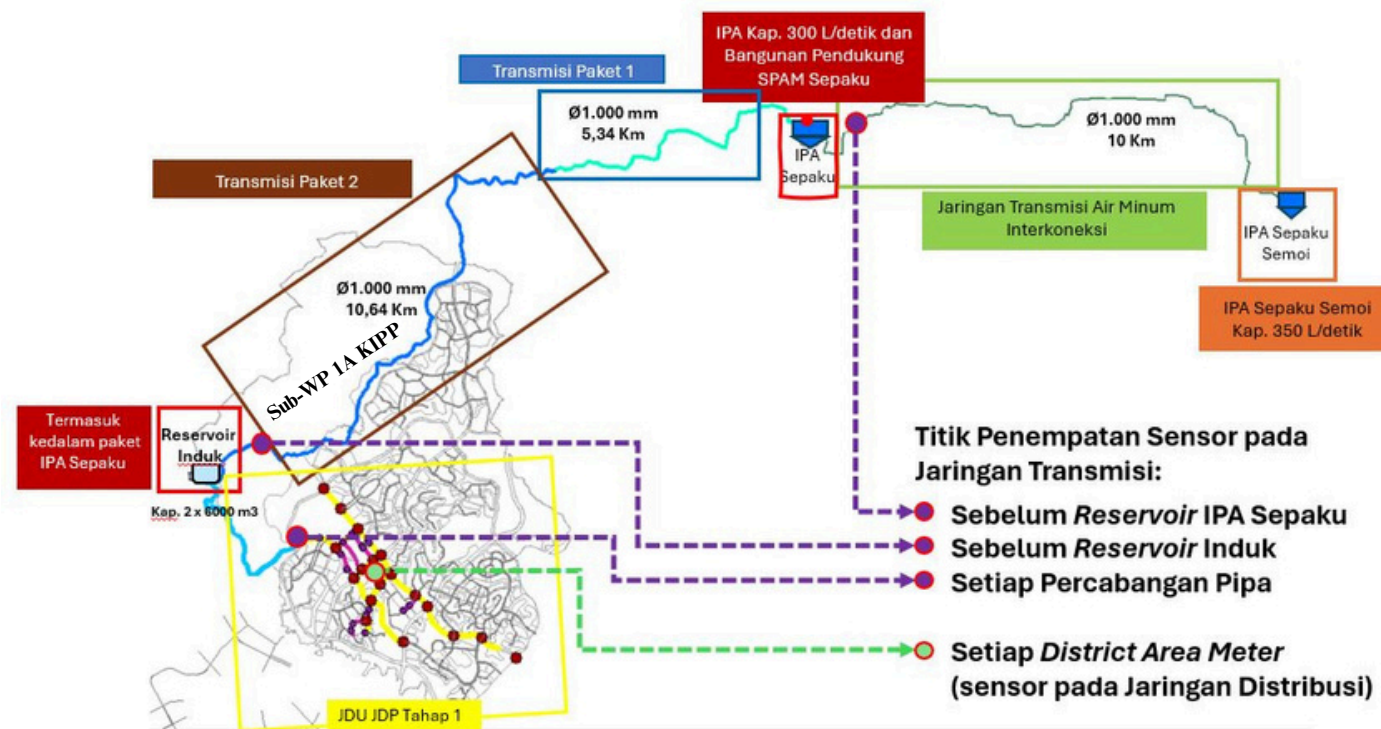
Penjelasan lengkap mengenai komponen-komponen *smart sensor* berdasarkan parameter kualitas air beserta lokasi pemasangannya dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Teknologi untuk Bangunan Instalasi Pengolahan Air (IPA)

Tabel 2. Komponen *Smart Sensor*

Rekomendasi Lokasi (berdasarkan Gambar 3)	Jenis Sensor yang Dipasang	Fungsi Sensor
<i>Intake</i>	Kekeruhan	Antisipasi kekeruhan tinggi di air baku
<i>Outlet Aerasi</i>	pH	Mendukung operasional SCM di unit koagulasi
Unit Koagulasi	Level Air	Identifikasi potensi sumbatan aliran / endapan
	Kekeruhan	Pengecekan kinerja proses koagulasi- flokulasi-sedimentasi
	pH	Pengecekan alkalinitas air baku di lab
	SCM	Penyesuaian otomatis dosing koagulan
Unit Flokuasi	Level Air	Identifikasi potensi sumbatan aliran / endapan
Sedimentasi	Level Air	Identifikasi potensi sumbatan aliran / endapan
	Kekeruhan	Pengecekan kinerja proses koagulasi- flokulasi-sedimentasi
	Sludge Level	Identifikasi volume lumpur di bak sedimentasi
Dual Media Filter	Level Air	Identifikasi potensi sumbatan aliran / endapan
	Kekeruhan	Pengecekan kinerja proses koagulasi- flokulasi-sedimentasi
	Bromide	Antisipasi pembentukan bromate
<i>Intermediate oxidation contact tank</i>	Ozon Terlarut atau <i>Oxidation-Reduction Potential (ORP)</i>	Identifikasi kondisi ozone generator
<i>Granular Activated Carbon (GAC) Filter</i>	Kekeruhan	Pengecekan kinerja proses koagulasi- flokulasi-sedimentasi
	pH	Mendukung operasional desinfeksi
<i>Clear Well</i>	Residu Klor	Mendukung operasional desinfeksi
	Level Air	Identifikasi potensi sumbatan aliran / endapan
	<i>Flow</i>	Identifikasi kondisi pompa transmisi air produksi
<i>Clear well (rekomendasi direct monitoring)</i>	E. Coli, Total Coli, Suhu, TDS, Kekeruhan, Warna, Bau, pH	Pemantauan standar kualitas air minum sesuai PerMenKes 2/2023
	<i>Trihalomethanes</i>	Identifikasi disinfektan untuk mencegah pencemaran
<i>Clear well (rekomendasi indirect monitoring)</i>	<i>Event detection system</i>	Pemantauan <i>surrogate indicator</i> (residu klor, klorida, pH, dll sesuai vendor) untuk memantau kontaminan

Teknologi yang diterapkan pada jaringan transmisi dan distribusi air bersih berupa sensor untuk mengukur kuantitas dan kualitas air. **Gambar 4** menampilkan rekomendasi lokasi pemasangan sensor tersebut berdasarkan potensi lokasi terjadinya kebocoran pada perpipaan.



Gambar 4. Rekomendasi Lokasi Pemasangan Sensor pada Jaringan Transmisi dan Distribusi Air Bersih di IKN (sumber: adaptasi dari bagan sistem penyediaan air minum Sepaku Kementerian PUPR)

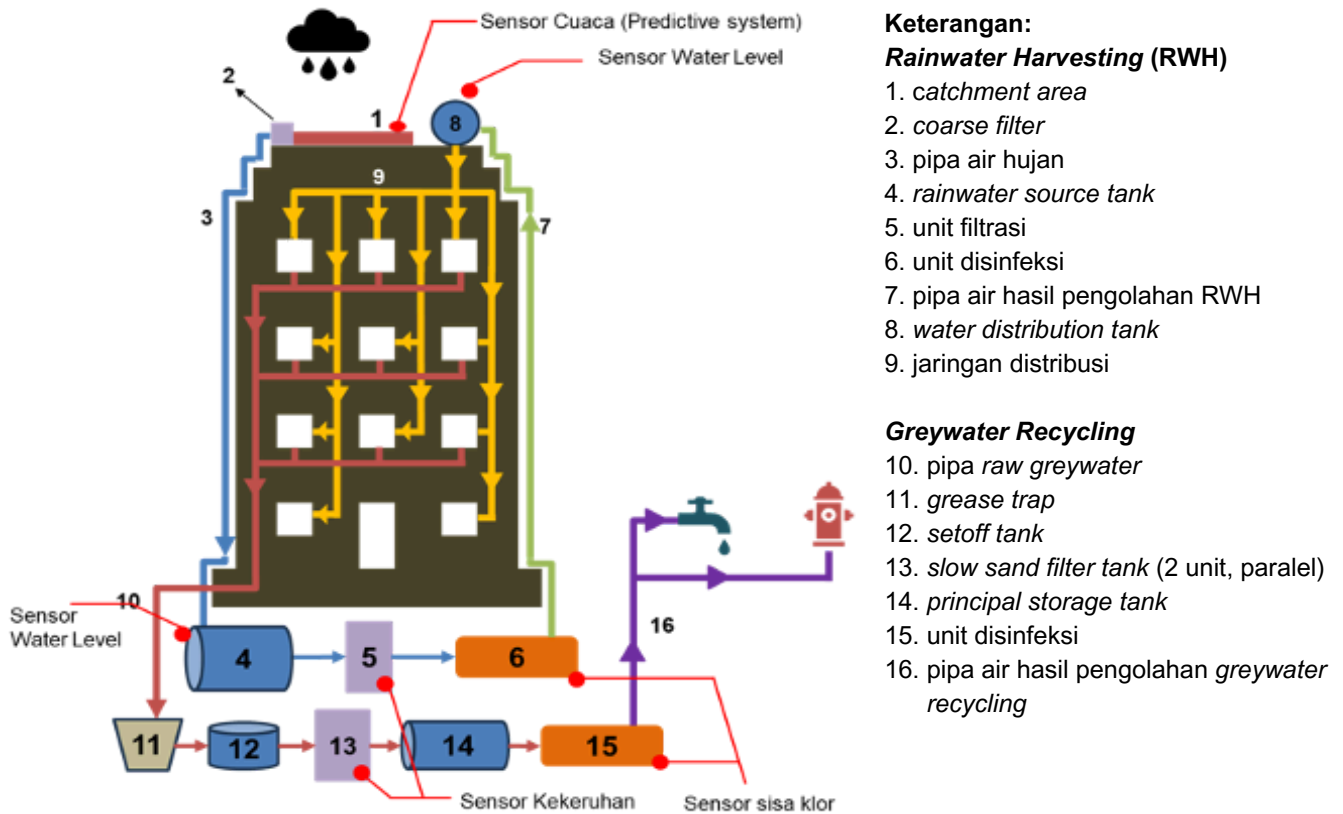
Adapun pada jaringan distribusi air, pemasangan sensor dilakukan pada setiap *District Metered Area* (DMA), yaitu daerah pelayanan air yang diklasifikasikan menjadi beberapa wilayah. Dalam kasus ini, terdapat 16 DMA pada Sub-WP 1A KIPP. Tabel 3 menampilkan kategori, jenis dan fungsi sensor yang direkomendasikan untuk sensor kuantitas dan kualitas air bersih di IKN.

Tabel 3. Sensor Kuantitas dan Kualitas Air untuk Jaringan Transmisi dan Distribusi Air Bersih di IKN

Rekomendasi Lokasi (berdasarkan Gambar 4)	Kategori Sensor	Jenis Sensor yang Dipasang	Fungsi Sensor
Pada Jaringan Transmisi: <ul style="list-style-type: none"> Sebelum Reservoir IPA Sepaku Sebelum Reservoir Induk Setiap percabangan pipa atau interkoneksi antara jaringan utama dengan jaringan lain 	Sensor Kuantitas Air	<i>Flowmeter</i>	Identifikasi potensi kebocoran air dan mengukur debit air
		<i>Pressure sensor</i>	Identifikasi potensi sumbatan aliran / endapan dan mengukur tekanan air
	Sensor Kualitas Air	Sensor Mikroorganisme	Mendeteksi kumpulan mikroorganisme (<i>biofouling</i> atau <i>biofilm</i>) pada pipa transmisi
Pada Jaringan Distribusi: <ul style="list-style-type: none"> Setiap <i>District Meter Area</i> (DMA) 	Sensor Kuantitas Air	<i>Flowmeter</i>	Identifikasi potensi kebocoran air dan mengukur debit air
		<i>Pressure sensor</i>	Identifikasi potensi sumbatan aliran / endapan dan mengukur tekanan air
	Sensor Kualitas Air	Sensor Mikroorganisme	Mendeteksi kumpulan mikroorganisme (<i>biofouling</i> atau <i>biofilm</i>)
		Sensor Multiparameter	Mendeteksi warna/UV, <i>total dissolved solid</i> (TDS), kekeruhan, suhu, residu klor, pH, <i>coliform</i> , dan logam berat

Teknologi *Rainwater Harvesting* dan *Greywater Recycling* untuk Pengolahan Air pada Gedung

Rainwater harvesting dilakukan untuk pengolahan air hujan guna memenuhi kebutuhan air *non-potable*, seperti *flushing* toilet. Sedangkan *greywater recycling* dilakukan untuk pengolahan air limbah domestik seperti binatu, cuci piring, dan mandi untuk kebutuhan seperti air pertamanan dan hidran. Teknologi *rainwater harvesting* dan *greywater recycling* dapat diterapkan pada bangunan gedung di IKN secara bersamaan atau disebut teknologi hybrid. Pada **Gambar 5** ditampilkan ilustrasi teknologi *hybrid* pengolahan air pada suatu bangunan gedung.



Gambar 5. Skema Rancangan *Rainwater Harvesting* dan *Greywater Recycling* pada Bangunan Gedung (Teknologi Hybrid)

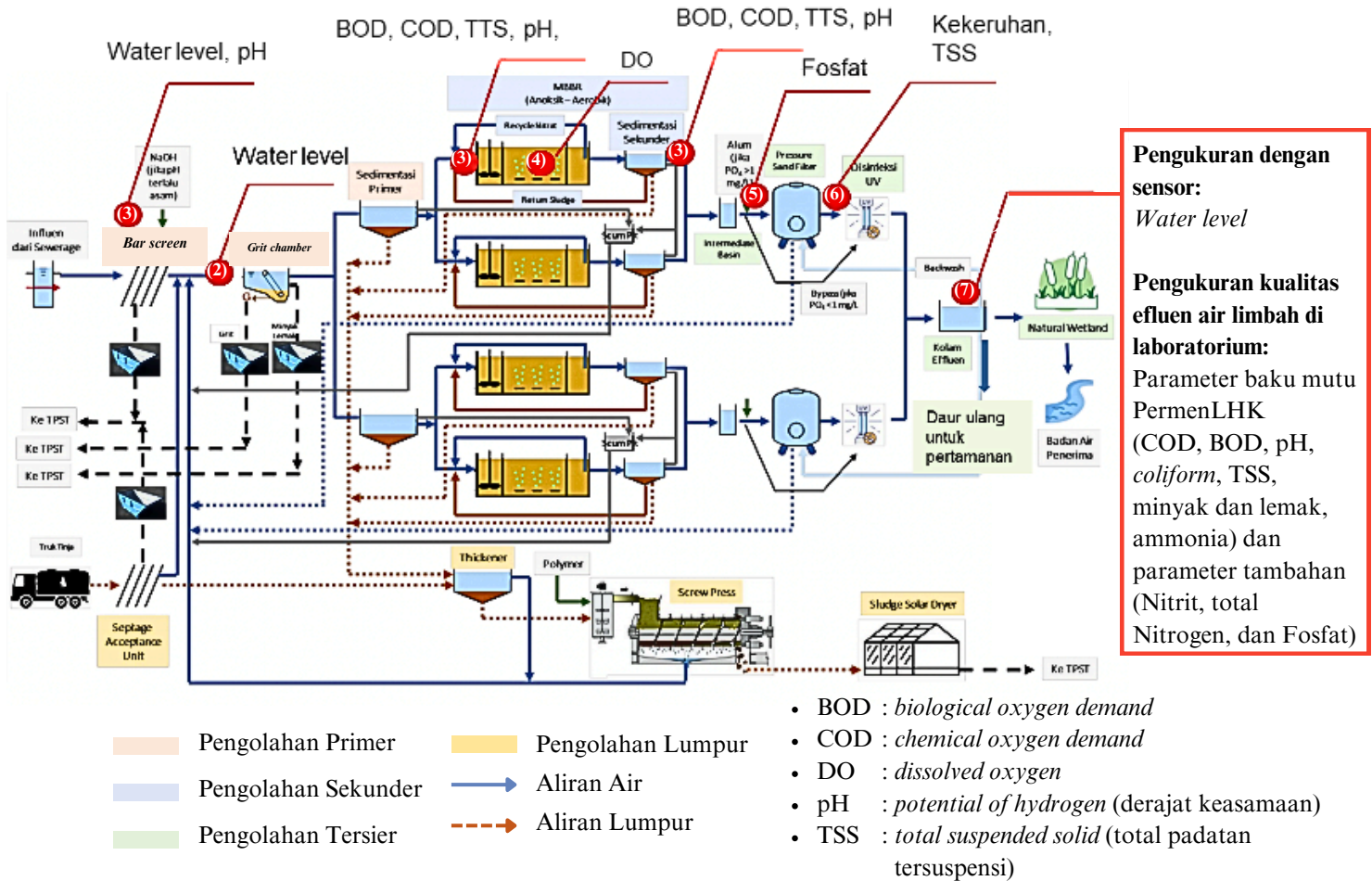
Gambar 5 dan **Tabel 4** menjelaskan mengenai komponen-komponen sensor pada teknologi *Rainwater Harvesting* dan *Greywater Recycling*.

Tabel 4. Pemasangan Sensor pada Sistem *Rainwater Harvesting* dan *Greywater Recycling* pada Bangunan Gedung

Rekomendasi Lokasi Pemasangan (berdasarkan Gambar 5)	Jenis Sensor yang Dipasang	Fungsi Sensor
Catchment area (nomor 1)	Sensor parameter cuaca dilengkapi predictive system	Untuk mengukur suhu udara, presipitasi, barometric pressure, relative humidity, vapor pressure, wind speed serta memprediksi potensi hujan berdasarkan data historis
Rainwater source tank (nomor 4) dan water distribution tank (nomor 8)	Sensor water level	Untuk otomasi sistem pompa dan debit air hujan (rainwater discharge)
Unit filtrasi (nomor 5 dan 13)	Sensor kekeruhan	Untuk mengetahui kondisi filter
Unit disinfeksi (nomor 6 dan 15)	Sensor sisa klor	Untuk mengetahui kesesuaian kadar klor yang telah diberikan

Teknologi untuk Instalasi Pengolahan Air Limbah Domestik (IPALD)

Desain IPALD 1,2,3 di wilayah KIPP IKN (**Gambar 1**) dengan menggunakan teknologi *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR), yaitu sistem pengolahan air limbah yang memanfaatkan mikroorganisme yang tumbuh pada media. Selain itu, IPALD juga terintegrasi dengan jaringan perpipaan air limbah kawasan serta Tempat Pengelolaan Sampah Terpadu (TPST). **Gambar 6** menunjukkan skema penempatan sensor pada IPALD.



Gambar 6. Skema Penempatan Sensor pada IPAL Domestik

Penjelasan lengkap mengenai komponen-komponen sensor pada **Gambar 6** dapat dilihat pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Fungsi Sensor pada IPAL Domestik

Rekomendasi Lokasi Pemasangan (berdasarkan Gambar 6)	Jenis Sensor yang Dipasang	Fungsi Sensor
Bar screen atau bak ekualisasi (no. 1)	pH	Untuk menjaga kondisi influen dapat diolah oleh MBBR
Bar screen (no. 1) dan grit chamber (no.2)	Water Level	Untuk mengetahui kapan unit perlu dilakukan pembersihan
Unit bak aerasi (MBBR) (no. 4)	Dissolved Oxygen (DO)	Untuk mengetahui kadar oksigen terlarut untuk menjaga bakteri tetap hidup
Influen dan efluen pengolahan biologis (no.3)	BOD dan COD	Untuk mengetahui kondisi <i>overloading</i> dan pemantauan rutin sesuai regulasi
	pH dan TSS	Untuk pemantauan rutin sesuai regulasi
Influen <i>pressured sand filtration</i> (unit filtrasi) (no.5)	Fosfor (PO4)	Untuk menentukan kebutuhan alum
Efluen <i>pressured sand filtration</i> (unit filtrasi) (no.6)	Kekeruhan dan TSS	Untuk mengetahui kondisi filter dan perintah <i>backwash</i> filter agar UV efektif
Efluen IPALD (no.7)	Kualitas efluen	Untuk pemantauan rutin sesuai regulasi (COD, BOD, pH, coliform, TSS, minyak dan lemak, ammonia, Nitrit, total nitrogen, dan fosfat)

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
EXECUTIVE SUMMARY	iv
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Ruang Lingkup.....	1
1.3 Tujuan.....	1
1.4 Metode.....	2
BAB II DASAR PERENCANAAN PENGELOLAAN AIR DI IKN	5
2.1 Undang-undang dan Peraturan Presiden	5
2.2 Rencana Induk.....	6
2.3 Konsep IKN Smart City	7
2.4 Komparasi dengan RIT & BED Kementerian PUPR.....	10
BAB III TEKNOLOGI PENGELOLAAN AIR	14
3.1 Smart Water Metering (SWM).....	14
3.2 Smart Water Quality Monitoring (SWQM).....	26
3.3 Smart Rain and Stormwater Management (SRSM)	35
3.4 Greywater Recycling dan Wastewater Reuse (GR).....	57
3.5 River Pollution Monitoring (RPM).....	72
3.6 SCADA Water and Wastewater Management System	98
BAB IV REKOMENDASI	116
4.1 Instalasi Pengolahan Air.....	116
4.2 Transmisi dan Distribusi Air di SPAM KIPP IKN	126
4.3 Pemantauan Kualitas Sungai (River Pollution Monitoring)	133
4.4 Pengolahan Air Hujan dan Greywater.....	136
4.5 Pengolahan Air Limbah pada Instalasi Pengolahan Air Limbah Domestik	143
BAB V KESIMPULAN	150
BAB VI PENUTUP	152

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Alur Kegiatan.....	3
Gambar 2.	Konsep <i>Smart City</i> yang diterapkan di IKN	8
Gambar 3.	Meteran Air Yang Berkembang Saat Ini (i) <i>Displacement Meter</i> (ii) <i>Velocity Meter</i> , (iii) <i>Compound Meter</i> , (iv) <i>Magnetic Meter</i> , (v) <i>Ultrasonic Meter</i> , dan (vi) <i>Vortex Meter</i>	16
Gambar 4.	Ilustrasi unit <i>Smart Water Meter</i> yang dipakai di Port Macquarie-Hastingscouncil, Australia	19
Gambar 5.	Arsitektur Sistem <i>Smart Water Meter</i> di Seosan City, Korea Selatan	21
Gambar 6.	Ilustrasi Sistem Pemantauan (a) <i>District Metered Area</i> (DMA) dan (b) <i>Sub District Metered Area</i> (SDMA) di Seosan City, Korea Selatan.....	21
Gambar 7.	Skema Pemrosesan Data Hingga Menjadi Sistem Peringatan Awal Mengenai.....	29
Gambar 8.	Kombinasi Logika Dari Beberapa Algoritma Dalam Pendeteksian Suatu Kondisi	30
Gambar 9.	Arsitektur Umum dari Sistem Smart RWH	37
Gambar 10.	Arsitektur RainGrid Stormwater Smartgrid.....	42
Gambar 11.	(a) Lokasi Fasilitas Pendidikan yang Menerapkan Teknologi <i>Rainwater Harvesting</i> ; (b, c) Unit <i>Rainwater Harvesting</i> yang Telah Terpasang.....	43
Gambar 12.	Detail Unit <i>Rainwater Harvesting</i> pada Dua Fasilitas Pendidikan di Hanoi, Vietnam	44
Gambar 13.	Skema Desain Tangki Penyimpanan Air Hujan Star City, Korea Selatan	46
Gambar 14.	Bagan Alir Pemilihan Status Wajib Kelola Air Hujan (Tahap 1).....	47
Gambar 15.	Bagan Alir Penetapan Status Wajib Kelola Air Hujan Kriteria Pertama.....	48
Gambar 16.	Bagan Alir Penetapan Status Wajib Kelola Air Hujan Kriteria Kedua	49
Gambar 17.	Skema Sistem Greywater Recycling Skala Rumah Tangga.....	58
Gambar 18.	Alur Pengolahan <i>Greywater</i>	59
Gambar 19.	Karakteristik Greywater dan Skema Alur Pengolahan	59
Gambar 20.	<i>Greenwall</i> dipasangkan pada Dinding Luar Hunian (Ghent, Belgia).....	60
Gambar 21.	Unit Brac Greywater Reuse System (kiri) dan iDus Controls' Conserve Pump system (kanan).....	62

Gambar 22. Ilustrasi sistem konvensional <i>greywater reuse</i> pada hunian bertingkat (apartemen) di Taiwan.....	64
Gambar 23. Diagram Alir ICGS	65
Gambar 24. Desain Unit Pengolahan <i>Greywater</i> : (a) Unit Penyaringan dan Pengendapan Awal; (b) Unit Filtrasi, Sterilisasi, dan Tangki Penyimpanan Air Hasil Olah.....	66
Gambar 25. Diagram Alir Proses Pengolahan Air Skema <i>Hybrid</i>	68
Gambar 26. Infrastruktur Bristol Is Open	73
Gambar 27. Lokasi Pemantauan Kualitas Air Sungai, Kota Bristol, Inggris.....	73
Gambar 28. Skema Transmisi Informasi Sistem Pemantauan Kualitas Air Sungai, Kota Bristol, Inggris	74
Gambar 29. Tampilan Antarmuka Visualisasi Data <i>Real-Time</i> menggunakan <i>Web-Based GUI</i>	75
Gambar 30. Titik Lokasi Unit RTWQMS di Sungai Ganga (Bentang Uttar Pradesh)	76
Gambar 31. Konektivitas Unit Sensor Pemantauan Kualitas Air dengan Unit “Con::cube”	76
Gambar 32. Konektivitas Komunikasi Seluruh Unit RTWQMS.....	77
Gambar 33. Sungai di Wilayah KIPP IKN	80
Gambar 34. Arsitektur SCADA Bidang Pengelolaan Air	99
Gambar 35. Ilustrasi Sistem Diagram Wiring PLC SCADA.....	100
Gambar 36. Remote Terminal Unit (RTU) Systems	101
Gambar 37. Arsitektur komunikasi SCADA	102
Gambar 38. Layer Arsitektur komunikasi SCADA	103
Gambar 39. Unit Instalasi Pengolahan Limbah di Rumania	106
Gambar.40. Arsitektur SCADA pada IPAL di Rumania.....	107
Gambar 41. Diagram Aktual IPAL pada Sistem SCADA dalam <i>Local Monitoring</i>	109
Gambar 42. Struktur <i>Real-Time Platform</i> Implementasi SCADA pada Pemantauan Sungai Vardar, Makedonia. Sumber: (Zaev et al., 2016).....	110
Gambar 43. Unit LMS yang Dibenamkan dalam Sungai	111
Gambar 44. Interkoneksi Struktur Sistem Otomasi Berbasis PLC dengan Seluruh Instrumen dan Perangkat Sensor.....	112
Gambar.45. <i>Flowchart Event Detection System (EDS)</i>	113
Gambar.46. Ilustrasi Kurva <i>Event Detection System (EDS)</i>	113

Gambar 47. Ilustrasi Sistem Pembayaran <i>Integrated Billing</i>	114
Gambar 48. Contoh Tampilan Utama Aplikasi <i>Mobile</i>	115
Gambar 49. Diagram Alir Pengolahan Air di IPA yang Rencanakan Pihak PUPR	118
Gambar 50. Rekomendasi Pertama (Direct Monitoring) Pemasangan Sensor dan Perangkat Pendukung di IPA IKN.....	120
Gambar 51. Rekomendasi Kedua (Indirect Monitoring) Pemasangan Sensor dan Perangkat Pendukung di IPA IKN.....	122
Gambar 52. Peta Transmisi air minum dari IPA Sepaku Semoi dan IPA Sepaku menuju wilayah KIPP IKN	126
Gambar 53. Skema Transmisi air minum dari IPA Sepaku Semoi dan IPA Sepaku menuju wilayah KIPP IKN beserta dengan lokasi penempatan sensor	127
Gambar 54. Peta jaringan distribusi air minum wilayah KIPP	130
Gambar 55. Skema jaringan distribusi air minum wilayah KIPP.....	130
Gambar 56. Lokasi Penempatan Sensor	134
Gambar 57. Ilustrasi Skema Rancangan <i>Greywater Recycling</i> dan <i>Rainwater Harvesting</i>	138
Gambar.58. Skema penempatan sensor pada <i>rainwater harvesting</i> dan <i>greywater recycling</i>	140
Gambar 59. Skema Proses Sistem IPAL Domestik 1, 2, dan 3 KIPP	144
Gambar 60. Skema penempatan sensor pada IPAL Domestik.....	144

DAFTAR TABEL

Tabel 1.	Prinsip IKN.....	9
Tabel 2.	Uraian perbandingan KAK, RIT, dan BED Smart Water Management.....	10
Tabel 3	Uraian Perbandingan KAK, RIT, dan BED.....	12
Tabel 4	Parameter yang Umum Dipakai Dalam Monitoring Kualitas Air.....	28
Tabel 5	Perbandingan Baku Mutu Wajib Kualitas Air Wajib di Indonesia Terhadap WHO dan Amerika Serikat (USEPA).....	31
Tabel 6	Perbandingan Baku Mutu Khusus Kualitas Air Wajib di Indonesia Terhadap WHO dan Amerika Serikat (USEPA).....	32
Tabel 7	Hubungan Antar Parameter Terhadap Polutan.....	34
Tabel 8.	Karakteristik Air Hujan dari Berbagai Lokasi.....	38
Tabel 9.	Perbandingan Baku Mutu Air Hujan dan Air Olahan.....	45
Tabel 10.	Penggunaan Berbagai Parameter Pemantauan Kualitas Air Hujan.....	52
Tabel 11.	Parameter Pengganti dan Hubungannya dengan Parameter Lainnya.....	54
Tabel 12.	Baku Mutu Air Higiene dan Sanitasi.....	55
Tabel 13.	Karakteristik Air Olahan (Influen) dan Hasil Olahan (Efluen) <i>Total Value Wall</i>	61
Tabel 14.	Target Kualitas Efluen IPAL Domestik IKN.....	69
Tabel 15.	Berbagai Parameter Pemantauan Kualitas Greywater.....	71
Tabel 16.	Baku Mutu Air Sungai di Indonesia.....	78
Tabel 17.	Hasil Uji Kualitas Air Baku Sungai Sepaku.....	81
Tabel 18.	Opsi Spesifikasi Teknis <i>Multiprobe Sensor</i>	85
Tabel 19.	Standar Teknis Syarat Minimum Sensor Pemantauan Kualitas Air Permukaan.....	86
Tabel 20.	Spesifikasi Teknis RTU Apabila Menggunakan <i>Smart Data Logger GSM</i>	90
Tabel 21.	Spesifikasi Teknis Perangkat GSM Modem.....	96
Tabel 22.	Rekomendasi Parameter Pemantauan Kualitas Air.....	117
Tabel 23.	Opsi Minimum dan Optimum dari Penerapan Rekomendasi Direct Monitoring Pemasangan Sensor dan Perangkat.....	121
Tabel 24.	Opsi Minimum dan Optimum dari Penerapan Rekomendasi Indirect Monitoring Pemasangan Sensor dan Perangkat.....	123

Tabel 25. Argumentasi Sensor Yang Direkomendasikan dan Sistem Intervensinya.....	124
Tabel 26. Rekomendasi Opsi Minimum dan Optimum Pada Pemasangan Sensor Dalam Jaringan Distribusi Air Minum.....	128
Tabel 27. Rekomendasi Opsi Minimum dan Optimum Pada Pemasangan Sensor Dalam Jaringan Distribusi Air Minum.....	131
Tabel 28. Implementasi Pemantauan Kualitas Sungai	135
Tabel 29. Argumentasi Sensor yang Direkomendasikan dan Sistem Intervensinya (<i>Greywater Recycling</i> dan <i>Rainwater Harvesting</i>).....	141
Tabel 30. Implementasi pemantauan kualitas hasil olahan air hujan dan <i>greywater</i>	142
Tabel 31. Argumentasi sensor yang direkomendasikan dan sistem intervensinya.....	147
Tabel 32. Opsi Implementasi Pemantauan Kualitas Air Limbah.....	148

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Perencanaan Sistem Smart Water dan Smart Wastewater Management untuk Ibu Kota Nusantara dan juga Pemanfaatan teknologi cerdas dalam pengelolaan Air Bersih dan Air Limbah untuk Ibu Kota Nusantara (IKN). Di mana peningkatan pertumbuhan penduduk dalam beberapa tahun terakhir memberikan permasalahan di Indonesia terutama dalam kebutuhan air bersih. Pemerintah Republik Indonesia memiliki komitmen sangat kuat untuk mencapai Sustainable Development Goals (SDG 6) dalam pemenuhan air bersih dan sanitasi bagi seluruh penduduk di Indonesia dan juga SDG 11 terkait kota dan pemukiman yang berkelanjutan pada Pembangunan Ibu Kota Nusantara (IKN). Sistem integrasi pengelolaan air bersih dan air limbah dikembangkan untuk menjadikan Ibu Kota Nusantara sebagai Smart City. Melalui pedoman ini, diharapkan Ibu Kota Nusantara memiliki sebuah sistem pengelolaan air bersih dan air limbah yang efisien, yang dapat meminimalisasi dampak terhadap lingkungan, dan berkontribusi terhadap manajemen air yang berkelanjutan.

1.2 Ruang Lingkup

Ruang Lingkup pekerjaan ini meliputi:

1. Pedoman *state-of-the art Smart Water Management* untuk Ibu Kota Nusantara yang meliputi *Smart Water Quality Monitoring, Smart Metering, Water SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)*;
2. Pedoman *state-of-the art Smart Wastewater Management* untuk Ibu Kota Nusantara yang meliputi *Smart Rain & Storm Water Management, River Pollution Monitoring, Greywater Recycling, Water SCADA*;

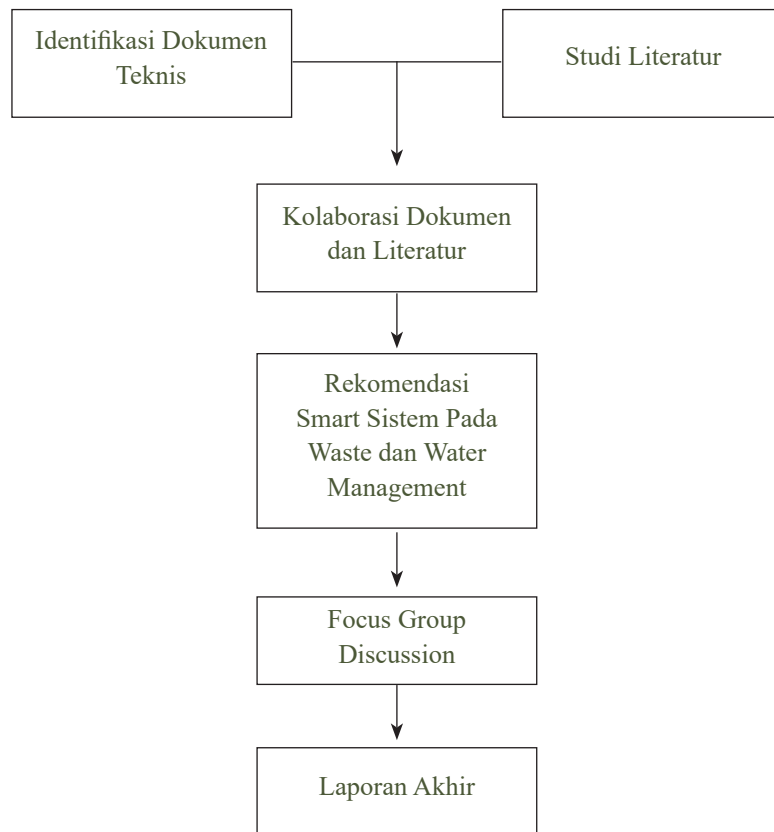
1.3 Tujuan

Tujuan dari penyusunan pedoman ini adalah menyediakan arahan dalam pengelolaan air minum dan air limbah di IKN dengan pemanfaatan teknologi cerdas. Sehingga pengelolaannya menjadi efisien dan efektif, yang akan mendukung kebijakan Pembangunan Rendah Karbon di IKN.

1. Mengkaji spesifikasi sensor yang diperlukan pada sistem pengolahan air bersih dan air limbah (antara lain; seperti aliran air, kualitas, suhu, dan tingkat polutan) untuk mendukung sistem pemantauan pengelolaan air bersih dan air limbah berbasis IoT (*Internet of Things*);
2. Mengkaji sistem untuk melakukan integrasi data dan proses analisis data berbasis kecerdasan buatan (AI) untuk menilai kinerja sistem dan mengidentifikasi potensi masalah;
3. Mengkaji sistem Pendukung Keputusan Cerdas dengan pengembangan alat bantu keputusan, antara lain: menentukan alat yang dapat memprediksi perilaku sistem, meramalkan masalah potensial, dan menyarankan solusi optimal untuk pengelolaan air limbah;
4. Mengkaji sistem pengendalian otomatis, seperti: pengendalian katup, pompa, dan komponen lainnya dan pengendalian sistem air bersih dan limbah;
5. Melakukan penyusunan laporan yang meliputi: Laporan Pendahuluan dan Laporan Akhir

1.4 Metode

Berdasarkan sasaran keluaran dari kegiatan, alur pelaksanaan pedoman yang diusulkan dapat dijelaskan pada Gambar 1. Langkah awal dari kegiatan akan difokuskan kepada diskusi pedoman terkait identifikasi dokumen disertai dengan pengumpulan data tinjauan lapangan. Secara paralel, kami juga mengumpulkan data terkait studi literatur penerapan *Smart water* dan *Smartwastewater management* di Indonesia maupun negara lain. Melalui studi tersebut, dapat diidentifikasi tipikal peralatan penunjang yang dibutuhkan dan berada di pasaran. Hasil studi awal dianalisis sehingga diperoleh kesimpulan yang sesuai. Elaborasi dari studi literatur dan aplikasi di lapangan dipergunakan sebagai dasar pengembangan teknologi *Smart water* dan *Smart wastewater management*. Selanjutnya, akan disusun beberapa alternatif konsep *Smart water* dan *Smart wastewater management* sebagai bahan pada *forum Group Discussion* (FGD). Segala informasi yang diperoleh dari kegiatan (FGD) dijadikan dasar untuk pengembangan arah pedoman yang nantinya dikembangkan menjadi Alternatif konsep yang merupakan hasil final dari pedoman.



Gambar 1 Alur Kegiatan

Sebagai luaran dari kegiatan ini, rekomendasi strategi transformasi dari pengelolaan air bersih dan air limbah yang *business as usual* menjadi *Smart water* dan *Smart wastewater management* yang merupakan kesatuan dari manajemen IKN *Smart City*.

Rencana transformasi terdiri dari Konsep Umum *smart water and wastewater management*, dan perencanaan dengan teknologi minimum dan optimum. Kondisi minimum merupakan perencanaan teknologi cerdas dimana segala sensor dan sistem diperlukan untuk memenuhi syarat *smart system* dapat berfungsi. Sedangkan kondisi optimum didefinisikan dimana kondisi perencanaan dalam kondisi ideal atau terbaik.

Secara umum, tahapan kegiatan yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Tahap Persiapan

Tahap persiapan terdiri dari koordinasi internal, penyusunan program kerja, penyusunan metode pelaksanaan kerja, pengumpulan data awal dan survei awal.

2. Tahap Pengumpulan Data

Pengumpulan data sekunder yang berupa dokumen teknis dan perencanaan terkait pengelolaan air bersih dan air limbah di IKN. Selain itu, studi literatur terkait *Smart*

water dan *Smart wastewater management* di Indonesia maupun negara lain juga akan dilakukan untuk mengidentifikasi spesifikasi dan katalog terkait sarana prasarana pendukung sistem *Smart water* dan *Smart wastewater management*.

3. Tahap Penyusunan pedoman, meliputi

- Pedoman awal yang berisi;
 - Analisis dokumen teknis dan perencanaan eksisting, meliputi penyelarasan dokumendan penetapan baseline rencana induk pengelolaan air bersih dan air limbah.
 - Analisis pengalaman terkait *Smart water* dan *Smart wastewater management* diIndonesia dan negara lain dengan mengidentifikasi sistem dan jenis peralatan yang dibutuhkan
 - Identifikasi spesifikasi dan katalog peralatan penunjang terlaksananya *Smart water* dan *Smart wastewater management* di IKN.
- Pedoman rekomendasi sistem alternatif
Penyusunan strategi perencanaan untuk penerapan *Smart water* dan *Smart wastewatermanagement* pada skala minimum dan optimum.
- Tahap Diskusi/Presentasi Pelaporan
 - Penyerahan draft laporan pendahuluan dan presentasi laporan pendahuluan
 - Presentasi draft laporan akhir
 - Penyerahan laporan akhir

BAB II

DASAR PERENCANAAN PENGELOLAAN AIR DI IKN

2.1 Undang-undang dan Peraturan Presiden

Undang – undang dan peraturan yang berkaitan dengan dasar pengelolaan air di IKN adalah:

1. Undang – undang No. 3 Tahun 2022 tentang Ibu Kota Negara;
2. Peraturan Pemerintah No. 17 Tahun 2022 tentang Pendanaan dan Pengelolaan Anggaran dalam Rangka Persiapan, Pembangunan, dan Pemindahan Ibu Kota Negara serta Penyelenggaraan Pemerintahan Daerah;
3. Peraturan Presiden No. 62 Tahun 2022 tentang Otorita Ibu Kota Nusantara;
4. Peraturan Presiden No. 63 Tahun 2022 tentang Perincian Rencana Induk Ibu Kota Nusantara;
5. Peraturan Presiden No.64 Tahun 2022 tentang Rencana Tata Ruang Kawasan Strategis Nasional Ibu Kota Nusantara Tahun 2022-2042;
6. Peraturan Presiden No.65 Tahun 2022 tentang Perolehan Tanah dan Pengelolaan Pertanahan di Ibu Kota Nusantara;
7. Peraturan Kepala Otorita IKN No.1/2022 tentang organisasi dan tata kerja Otorita Ibu Kota Negara;
8. Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup;
9. Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang kesehatan lingkungan;
10. Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 4 Tahun 2017 tentang Penyelenggaraan Sistem Pengelolaan Air Limbah Domestik;
11. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 68 Tahun 2016 tentang baku mutu air limbah domestik.

2.2 Rencana Induk

2.2.1 Perencanaan Infrastruktur Air Minum

Berdasarkan dokumen Rencana Induk Terintegrasi (RIT) PUPR, disebutkan bahwa Penyediaan air minum untuk Ibu Kota Negara yang baru terdiri dari 2 (dua) bagian konsep yaitu konsep Penyediaan Air Baku (PAB) dan konsep Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM). Target SPAM adalah pelayanan 100% melalui jaringan perpipaan dengan kualitas air baku siap minum yang mengacu ke baku mutu air minum Permenkes No. 2 Tahun 2023. Komponen SPAM terdiri dari bangunan intake, IPA, pipa transmisi, reservoir, dan jaringan distribusi. Dalam dokumen ini juga terdapat 4 *key performance index* (KPI) yang perlu dipenuhi, yakni:

- Penghematan penggunaan air dengan objektif seperti mendukung penghematan penggunaan air kawasan sebagai implementasi strategi air berkelanjutan dan penggunaan *low flow plumbing fixtures* sebagai standar
- Sumber Air Alternatif (di luar air tanah dan PDAM) dengan objektif seperti mendukung penggunaan air alternatif (selain air tanah dan air dari PDAM) secara mandiri, penggunaan *recycled water* untuk kebutuhan non-domestik, pelaksanaan dan penggunaan *rainwater harvesting*, standarisasi penggunaan air daur ulang dan *rainwater harvesting*.
- Pasokan Air Minum/ *Potable Water Supply* dengan objektif seperti menjamin terlayannya semua rumah tangga dengan akses kepada sumber air minum, termasuk didalamnya: air dari pipa/ PDAM, *public tap*, pengeboran atau pompa, sumur, mata air atau air hujan. Tercapainya pasokan air 24 jam sehari dan terpenuhinya kriteria 4K bagi 100% wilayah terbangun di KIPP.

Suplai Air Termonitor ICT dengan objektif seperti mendorong efisiensi penggunaan air kawasan. Diimplementasinya sistem SCADA (*supervisory control and data acquisition*) atau sejenisnya untuk melingkupi keseluruhan sistem penyediaan air. Integrasi sistem ICT drainase dengan pengelolaan infrastruktur air terpadu dan pengelolaan infrastruktur permukiman. Sistem yang digunakan harus memiliki fitur-fasilitas kontrol air terpusat yang meliputi:

- o Transduser level air yang mencatat level air di reservoir,
- o transduser tekanan pipa yang memastikan air terpompa dan mengalir secara efisien,
- o *flowmeter* yang mengukur pengantaran air, *pressure-sustaining & pressure-reducing valves* yang membuka dan menutup secara inkremental untuk mengatur laju air.

2.2.2 Perencanaan Infrastruktur Air Limbah

Berdasarkan dokumen Rencana Induk Terintegrasi (RIT) PUPR, pengelolaan air limbah domestik di KIPP IKN direncanakan akan dilayani dengan 6 IPAL. Beberapa *Key Performance Indicator* di dalam sistem pengelolaan air limbah domestik di KIPP IKN antara lain adalah:

- Menyediakan pelayanan air limbah domestik dengan 100% layanan air limbah domestik perpipaan dan pengolahan yang memenuhi baku mutu.
- Menyediakan pelayanan pengolahan air limbah domestik, dengan efluen yang dapat mendukung penyediaan air baku hasil olahan/air bauran untuk kegiatan di IKN, sehingga kualitas air sungai terjaga, menjaga populasi ikan dan biota air endemic yang terdapat di sungai.
- Pelaksanaan pengolahan air limbah domestik yang diolah dengan teknologi modern, bertujuan untuk mengurangi pencemaran di lingkungan, mendukung penggunaan air alternatif (selain air tanah dan air dari PDAM) secara mandiri.
- Penyediaan pelayanan air limbah domestik dengan sistem pemantauan dan pendataan bagi setiap prasarana pengolahan air limbah domestik, sehingga air hasil olahan yang dihasilkan terjaga kualitasnya dan tidak mencemari lingkungan dilengkapi dengan control global terpusat melalui *computers control action* yang mampu melakukan pengukuran *real-time* parameter-parameter pengolahan.

Selain itu, berdasarkan *Basic Engineering Design* (BED), disebutkan bahwa terdapat perencanaan daur ulang atau pemanfaatan kembali efluen air limbah. Besaran air limbah yang dapat didaur ulang diharapkan mencapai 40% dari debit yang diolah pada IPAL. Pemanfaatan air hasil daur ulang initerbatas sebagai sumber air sistem pemadam kebakaran kawasan dan pertamanan. Mengacu kepada BED, teknologi pengolahan air limbah yang digunakan adalah teknologi MBBR sebagai pengolahan sekunder, serta desinfeksi UV dan *pressure sand filter* sebagai pengolahan tersier.

2.3 Konsep IKN *Smart City*

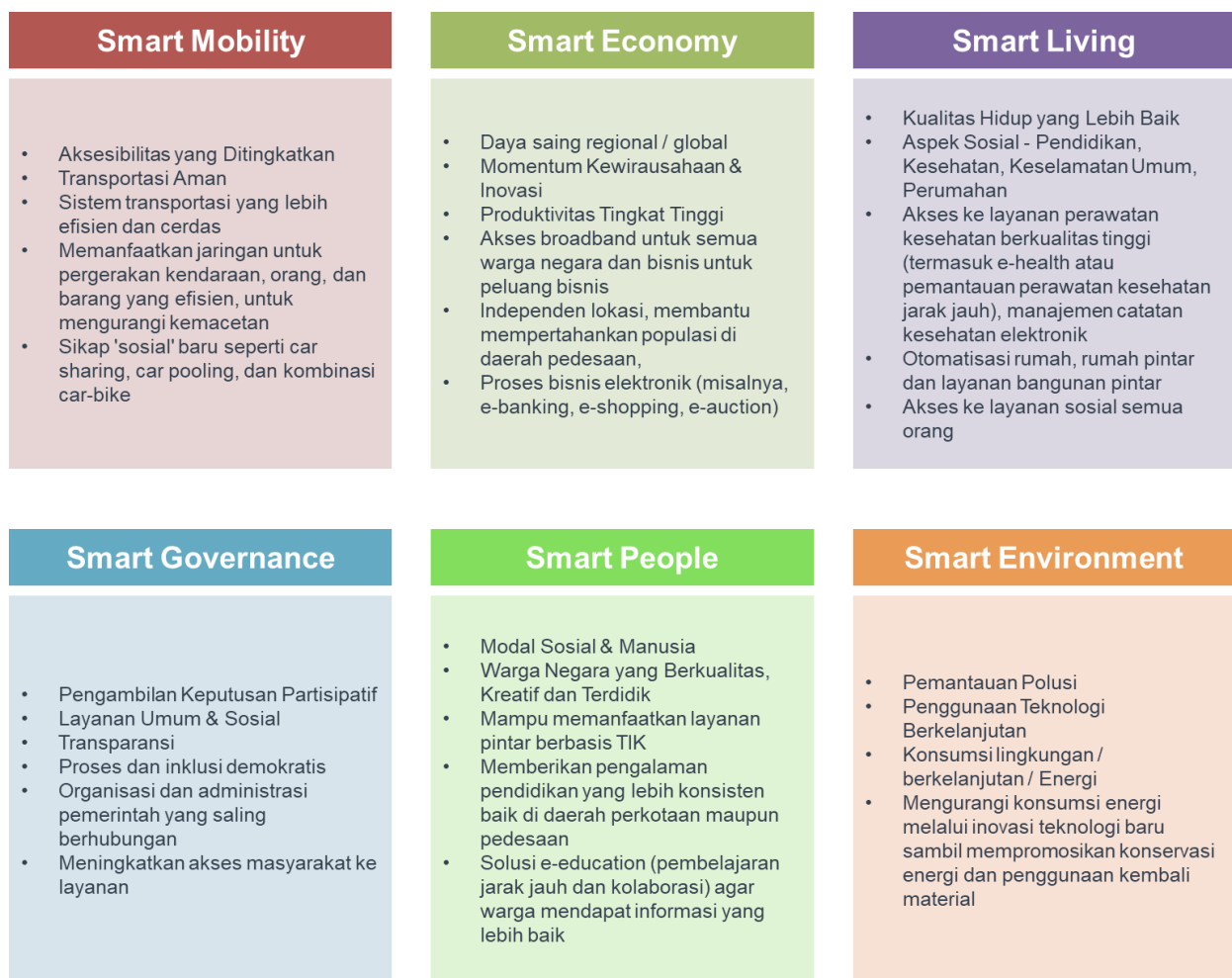
Berdasarkan Rencana Induk Terintegrasi (RIT) Kementerian PUPR, Kawasan IKN sebagai ibukota negara yang baru direncanakan dan dikelola berdasarkan unsur – unsur kota berkelanjutan, kota hijau, dan kota cerdas (*Smart city*). Konsep *smart city* yang disebutkan pada RIT meliputi:

- Sebuah kota berkinerja baik dengan berpandangan ke dalam ekonomi, penduduk, pemerintahan, mobilitas, dan lingkungan hidup.
- Sebuah kota yang mengontrol dan mengintegrasikan semua infrastruktur.
- Sebuah kota yang dapat menghubungkan infrastruktur fisik, infrastruktur IT, infrastruktur sosial, dan infrastruktur bisnis untuk meningkatkan kecerdasan kota.

- *Smart city* membuat kota lebih efisien dan layak huni.
- Penggunaan smart computing untuk membuat *smart city* dan fasilitasnya saling berhubungan dan efisien.

Smart city memiliki 6 dimensi (**Gambar 2**), yaitu: *smart economy* (inovasi dan persaingan), *smart mobility* (transportasi dan infrastruktur), *smart people* (kreativitas dan modal sosial), *smart environment* (keberlanjutan dan sumber daya), *smart living* (kualitas hidup dan kebudayaan), dan *smart government* (pemberdayaan dan partisipasi).

Tujuan dari *smart environment* adalah untuk menciptakan lingkungan yang bisa memberikan kenyamanan, keberlanjutan sumber daya, keindahan fisik maupun non fisik, visual maupun tidak, bagi masyarakat dan publik lingkungan yang bersih tertata, Ruang Terbuka Hijau (RTH) yang stabil merupakan contoh dari penerapan *Smart environment*.



Gambar 2. Konsep *Smart City* yang diterapkan di IKN
Sumber: Rencana Induk Terintegrasi (RIT) Kementerian PUPR

Selain itu, IKN memiliki 8 prinsip dan 24 KPI, yang ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 1. Prinsip IKN

Prinsip	KPI
1. Selaras dengan alam	1.1.> 75% dari 256.142 Ha area untuk ruang hijau (65% area dilindungi dan 10% area produksi pangan) 1.2. 100% penduduk dapat mengakses ruang hijau rekreasi dalam 10 menit 1.3. 100% penggantian ruang hijau untuk setiap bangunan bertingkat institusional, komersial, dan hunian
2. Bhineka tunggal ika	2.1. 100% integrasi seluruh penduduk 2.2. 100% warga dapat mengakses layanan sosial/ masyarakat dalam waktu 10 menit 2.3. 100% ruang publik dirancang menggunakan prinsip akses universal, kearifan lokal, serta desain yang responsif gender dan inklusif
3. Terhubung aktif dan mudah diakses	3.1. 80% perjalanan dengan transportasi publik atau mobilitas aktif 3.2. 10 menit ke fasilitas penting dan simpul transportasi publik 3.3.< 50 menit koneksi transit ekspres dari Kawasan Inti Pusat Pemerintahan ke bandara strategis pada tahun 2030
4. Rendah emisi karbon	4.1.Instalasi kapasitas energi terbarukan akan memenuhi 100% kebutuhan energi Ibu Kota Nusantara 4.2. 60% penghematan energi untuk konservasi energi dalam gedung 4.3. <i>Net zero emission</i> untuk Ibu Kota Nusantara di 2045 di kawasan 256.142 Ha
5. Sirkular dan tangguh	5.1.> 10% dari lahan 256.142 Ha tersedia untuk kebutuhan produksi pangan 5.2. 60% daur ulang timbulan limbah padat di tahun 2045 5.3. 100% air limbah akan diolah melalui sistem pengolahan pada tahun 2035
6. Aman dan terjangkau	1.1. Ranking 10 besar kota paling layak huni di dunia pada tahun 2045 1.2. Pemukiman yang ada dan terencana di kawasan 256.142 Ha memiliki akses terhadap infrastruktur penting di 2045 6.3 Perumahan layak, aman, dan terjangkau yang memenuhi rasio hunian berimbang.
7. Nyaman dan efisien melalui teknologi	7.1.Mewujudkan peringkat sangat tinggi dalam E-Government Development Index (EGDI) oleh PBB 7.2. 100% konektivitas digital dan teknologi, informasi, serta komunikasi untuk semua penduduk dan bisnis 7.3.> 75% kepuasan dunia usaha atas layanan digital
8. Peluang ekonomi untuk semua	8.1. 0% kemiskinan pada populasi Ibu Kota Nusantara pada tahun 2035 8.2. Pendapatan domestik regional bruto (PDRB) per kapita setara ekonomi berpendapatan tinggi Rasio Gini regional terendah di Indonesia di 2045

Pedoman *smart water* dan *wastewater management* ini mendukung 3 prinsip IKN, yaitu sirkulardan tangguh, aman dan terjangkau, dan nyaman dan efisien melalui teknologi. Selain itu, Pedoman ini juga mendukung beberapa KPI IKN, yaitu: (5.3) 100% air limbah akan diolah melalui sistem pengolahan pada tahun 2035, (6.1) Ranking 10 besar kota paling layak huni di dunia pada tahun 2045, (6.2) Pemukiman yang ada dan terencana di kawasan 256.142 Ha memiliki akses terhadap infrastruktur penting di 2045, dan (7.2) 100% konektivitas digital dan teknologi, informasi, serta komunikasi untuk semua penduduk dan bisnis.

2.4 Komparasi dengan RIT & BED Kementerian PUPR

Perbandingan Kerangka Acuan Kerja dengan beberapa dokumen kementerian PUPR, seperti Rencana Induk Terintegrasi (RIT) dan Basic Engineering Drawing (BED) terkait Smart Water Management dan juga Smart Wastewater Management secara detail dijelaskan pada tabel 2 dan tabel 3 .

Tabel 2. Uraian perbandingan KAK, RIT, dan BED Smart Water *Management*

KAK	RIT	BED
Smart Water Meter		
<ul style="list-style-type: none"> • Dapat dipantau secara realtime oleh warga melalui aplikasi dengan notifikasi penggunaan air berlebih dan deteksi kebocoran • Otomatis melihat penggunaan air dan penagihan secara akurat departemen IKN. • Dapat membuka atau mematikan pasokan air ke properti dari jarak jauh memungkinkan respons cepat terhadap permintaan layanan dan membantu mengelola akun yang mengalami tunggakan. • Menghasilkan volume data yang besar yang dapat dianalisis untuk mendapatkan wawasan tentang pola • penggunaan air, mengidentifikasi tren dan mengoptimalkan jaringan distribusi air 	<ul style="list-style-type: none"> • Diimplementasinya sistem SCADA(<i>supervisory control and data acquisition</i>) atau sejenisnya untuk melingkupi keseluruhan sistem penyediaan air. • Mendorong efisiensi penggunaan air kawasan • Transmisi distribusi mampu mengalirkan debit aliran untuk kebutuhan jam puncak. Dipasang angker penahan pipa untuk mencegah terjadinya kerusakan atau bocor pada pipa 	<ul style="list-style-type: none"> • Tidak terdapat penjelasan khusus terkait meteran air pada dokumen

KAK	RIT	BED
<i>Smart Water Quality Monitoring</i>		
<ul style="list-style-type: none"> • Menerima pemberitahuan peringatan secara real time tentang segala risiko terkait kualitas air yang meliputi tingkat polusi dan bahan kimia berbahaya • Operator dapat mengatur waktu untuk menilai parameter kualitas air pada interval yang diperlukan 	<ul style="list-style-type: none"> • Tidak terdapat penjelasan khusus terkait meteran air pada dokumen 	<ul style="list-style-type: none"> • Kualitas air minum mulai dari outlet unit produksi hingga mencapai pelanggan diharapkan untuk memenuhi baku mutu kualitas air minum Permenkes 492/2010 dan dapat memenuhi standar kualitas air minum yang berlaku di negara lain
<i>Smart Water Meter</i>		
<ul style="list-style-type: none"> • Operator dapat diinformasikan tentang kualitas air di beberapa lokasi di seluruh IKN menggunakan GIS dan jaringan sensor terintegrasi ke ICCC (Integrated Command and Control Center) dapat dilihat melalui dasbor dan aplikasi IKN (Smart City). 		<ul style="list-style-type: none"> • Baku mutu air baku digunakan Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup

Tabel 3 Uraian Perbandingan KAK, RIT, dan BED
Smart Wastewater Management.

KAK	RIT	BED
<i>Rain & Stormwater Management</i>		
Operator dapat melakukan pemantauan secara real time terhadap sistem yang melakukan pengumpulan, penyimpanan, dan memproses (akan melibatkan teknik penyaringan, dll.)	<ul style="list-style-type: none"> • Mengusung konsep drainase ramah lingkungan. • Belum ada rencana dan konsep terkait pemantauan secara real time terhadap sistem yang melakukan pengumpulan, penyimpanan, dan memproses, 	<ul style="list-style-type: none"> • Perencanaan Drainase Air hujan di wilayah KIPP ditangkap dalam saluran drainase yang akan dialirkan ke danau retensi atau check dam sebelum ke sungai. • Drainase pembuangan air hujan bertujuan untuk mengalirkan limpasan tanpa erosi atau penyebaran polusi dan mencegah terjadinya genangan • Belum ada rencana dan konsep terkait pemantauan secara real time terhadap sistem yang melakukan pengumpulan, penyimpanan, dan memproses.
Operator dapat memanfaatkan air hujan atau badai di IKN (contoh: pembersihan sistem HVAC, pemeliharaan sistem, pengisian ulang air tanah, dll.)	<ul style="list-style-type: none"> • Telah <i>dijelaskan rencana konservasi air dengan teknik Rainwater Harvesting</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Belum ada penjelasan terkait pemanfaatan air hujan.
Operator menerima pemberitahuan peringatan untuk mendeteksi arus masuk (inflow) dan infiltrasi	<ul style="list-style-type: none"> • Belum ada penjelasan terkait 	<ul style="list-style-type: none"> • Belum ada penjelasan terkait
Sistem ini dilengkapi dengan Pemetaan GIS dari Sistem Manajemen Stormwater (limpasan air hujan)	Belum ada penjelasan terkait	<ul style="list-style-type: none"> • Belum ada penjelasan terkait

<i>Greywater recycling</i>		
Sistem dapat mengidentifikasi tingkat aliran greywater yang terkumpul di beberapa titik dan mengalihkannya ke beberapa titik penggunaan dalam IKN	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Blackwater</i> dan <i>Greywater</i> diolah di IPAL agar menghasilkan air daur ulang untuk kebutuhan non potable • Belum ada penjelasan terkait rencana <i>greywater recycling</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> • Direncanakan daur ulang efluen air limbah menggunakan membran (ultrafiltrasi) dengan besaran air yang didaur ulang yaitu 40% dari debit lahan IPAL. • Air hasil daur ulang ini dimanfaatkan terbatas sebagai sumber air sistem pemadam kebakaran kawasan dan pertamanan • Belum ada penjelasan terkait rencana <i>greywater recycling</i>.
<i>River Pollution Monitoring</i>		
Operator dapat melakukan pemantauan kualitas air di sungai secara berkala di IKN	<ul style="list-style-type: none"> • Tujuan pelayanan pengolahan air limbah domestik adalah menghasilkan efluen yang dapat mendukung penyediaan air baku hasil olahan/air bauran untuk kegiatan di IKN, sehingga kualitas air sungai terjaga, menjaga populasi ikan dan biota air endemik yang terdapat di sungai. • Belum ada penjelasan terkait <i>smart river pollution monitoring</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> • Belum ada penjelasan terkait <i>smart river pollution monitoring</i>.

BAB III

TEKNOLOGI PENGELOLAAN AIR

3.1 Smart Water Metering (SWM)

Pada sub – bab ini akan dibahas terkait Pedoman literatur SWM di berbagai negara, jenis parameter dan sensor yang biasa digunakan dalam SWM, dan regulasi terkait SWM.

3.1.1 State-of-the-art

Secara umum, meteran air terbagi atas empat kategori berdasarkan mekanisme kerjanya, yaitu (i) *displacement meters*; (ii) *velocity meters*; (iii) *compound (or combination)*; dan (iv) *electromagnetic meters* (Boyle et al., 2013). *Displacement meters* merupakan instrument yang bekerja dengan memanfaatkan pergerakan/perpindahan elemen mekanis akibat aliran air yang melalui alat yang tersematkan dalam meteran air. Meteran jenis ini umum digunakan di berbagai industri karena harganya yang relatif lebih murah dibandingkan alat lainnya walaupun memiliki tingkat ketidakakuratan sekitar 2% (Morris & Langari, 2012). *Velocity meters* merupakan jenis meteran air yang memanfaatkan kecepatan perputaran impeller/baling-baling dalam alat untuk mengukur debit aliran (Morris & Langari, 2012)

Compound meter merupakan meteran air yang mengkombinasikan teknologi *displacement* dan baling-baling dalam menghitung debit air sehingga hasil pengukuran dapat lebih presisi (Preston Marcoux, 2023). *Electromagnetic meter* merupakan alat pengukur debit air yang menggunakan medan magnet. Meteran ini dikenal dengan keakuratannya dan sering digunakan pada pipa yang lebih besar dan aplikasi komersial atau industri (Karen Ellis, 2023). Selain mengukur air bersih, meteran jenis ini juga mampu mengukur debit air limbah karena tidak ada bagian dari sensor yang bergerak sehingga air limbah mengandung solid ataupun kotoran tidak akan mempunyai pengaruh apapun pada kinerja dari flow meter.

Hal tersebut menyebabkan sensor jenis ini memiliki usia pakai yang lebih lama dan bebas *maintenance*. Pada pengukurannya meteran jenis ini hanya dapat bekerja pada air yang memiliki nilai konduktivitas tertentu sehingga apabila air tidak sesuai dengan

konduktivitas yang dipersyaratkan maka alat tidak dapat melakukan pembacaan (Indonesia Industrial Part, 2009).

Untuk saat ini perkembangan teknologi meteran menyebabkan semakin banyaknya metode yang dapat digunakan dalam mengukur debit aliran air. Salah satu metode lain yang dalam mengukur debit air adalah dengan menggunakan *ultrasonic meter* dan *vortex meter*. *Ultrasonic meter* bekerja dengan menggunakan gelombang suara untuk mengukur aliran air. Pengukur ini sangat akurat dan dapat mengukur aliran air secara tidak langsung (aliran maju dan mundur).

Pengukur ini sering digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan pengukuran yang tepat (Karen Ellis, 2023). Penggunaan meteran air jenis ini memiliki keunggulan pada biaya perawatannya yang rendah karena tidak adanya bagian dari meteran yang bagian yang bergerak sehingga tidak terjadi keausan pada part meteran air (Indonesia Industrial Part, 2009). Kelemahan dari meteran jenis ini adalah biaya pengadaan yang cukup tinggi, hal tersebut karena satu unit meteran jenis ini memiliki biaya yang lebih mahal dibandingkan dengan meteran jenis lainnya. Selain itu, karena memanfaatkan gelombang ultrasonik, maka meteran jenis ini kurang direkomendasikan untuk mengukur cairan kontaminan pekat atau slurry.



(i)



(ii)



(iii)



(iv)



(v)



(vi)

Gambar 3. Meteran Air Yang Berkembang Saat Ini (i) *Displacement Meter* (ii) *Velocity Meter*, (iii) *Compound Meter*, (iv) *Magnetic Meter*, (v) *Ultrasonic Meter*, dan (vi) *VortexMeter*

Sumber:(Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig und Berlin, 2019)

Masing-masing jenis meteran memiliki fitur dan kemampuan yang berbeda. Pilihan jenis meteran tergantung pada faktor-faktor seperti kebutuhan spesifik perusahaan utilitas, tingkat perincian data yang diperlukan, dan infrastruktur yang tersedia untuk komunikasi data (Karen Ellis, 2023).

Smart water meter merupakan perangkat elektronik yang mampu didesain untuk mencatat penggunaan air pelanggan secara otomatis (Adams & Jokonya, 2021). Penerapan *Smart water metering* atau meteran pintar pada dasarnya terdiri atas tiga aspek, yaitu teknologi meteran, penghasil dan manajemen data, dan kecanggihan sistem (Boyle et al., 2013). Dari aspek teknologi, meteran air saat ini memungkinkan untuk menyimpan, menampilkan, membaca dan mengirimkan data konsumsi air masyarakat serta dapat diakses oleh masyarakat dan instansi terkait secara *real time* lalu mengirimkan data berupa sinyal ke stasiun penerima data pada interval waktu yang telah ditentukan. Selain itu, unit ini dapat memiliki sistem komunikasi bawaan seperti NB-IoT (*Narrowband Internet of Things*) (Randall & Koech, 2019). Penggunaan alat ini dinilai memiliki manfaat yang cukup banyak bagi instansi penyedia air seperti mengetahui pola kebutuhan air, deteksi kebocoran dini, dan mempermudah pembacaan meteran air secara jarak jauh dan frekuensi yang lebih tinggi (Oren & Stroh, 2013). Selain itu, penggunaan SWM dinilai dapat menguntungkan berbagai pihak karena dapat menghemat menggunakan air penghematan biaya, peningkatan keuntungan, peningkatan kepuasan masyarakat (Beal & Flynn, 2015).

Sistem penghasil dan manajemen data dasarnya terdiri atas empat proses utama, yakni (i) pengukuran; (ii) transfer data; (iii) pengolahan dan analisis; dan (iv) umpan balik data penggunaan air. Pada pelaksanaannya, umumnya terjadi proses penyimpanan data sedangkan cara yang digunakan untuk proses-proses ini paling baik dijelaskan dalam istilah mode (cara pengukuran atau pengiriman), resolusi (kepadatan dan rincian data), dan frekuensi (keteraturan data) (Boyle et al., 2013).

Dari aspek kecanggihan sistem, pembeda antara meteran konvensional dan pintar terletak tingkat kecanggihan pengukuran dan kontrol, atau pengoperasiannya. Meteran pintar dikenal sebagai pembacaan meteran jarak jauh, melibatkan transfer otomatis data konsumsi air yang direkam, biasanya melalui transmisi radio publik (misalnya, GPRS, CDMA, GSM) atau pribadi, ke server untuk penyimpanan dan pemrosesan data selanjutnya oleh pihak berkepentingan.

Selain itu, meteran pintar juga mampu menampilkan data yang lebih akurat dengan waktu yang tepat serta frekuensi data yang lebih padat. Meteran pintar juga memungkinkan komunikasi dua arah antara pengukur dengan pihak berkepentingan melalui pencatat data dan, kepadatan data yang jauh lebih tinggi. Meteran pintar ini secara efektif menciptakan aliran data (*big data*) yang memungkinkan pemantauan secara *realtime* dan analisis data, meskipun analisis penggunaan akhir saat ini masih memerlukan pemeriksaan retrospeksi menggunakan perangkat lunak penelusuran lain untuk menghasilkan pengukuran yang berarti. Dengan komunikasi dua arah maka dapat menurunkan intensitas operator meteran untuk melakukan pembacaan meteran permintaan, untuk memastikan apakah air baru saja mengalir melalui meteran dan masuk ke lokasi, dan mengeluarkan perintah ke meteran untuk melakukan tugas-tugas tertentu seperti memutus atau membatasi air aliran air (Boyle et al., 2013).

Walau terdengar menguntungkan, penggunaan teknologi *smart water meter* masih memiliki beberapa tantangan seperti pengaturan agar *supply and demand* air seimbang, biaya penerapan teknologi dan perubahan pola pemakaian air masyarakat, manajemen kebutuhan data, interpretasi dan analisis data yang masuk, serta privasi pelanggan (Boyle et al., 2013).

Sebagai acuan penerapan teknologi ini, di Australia penerapan smart water metering telah diterapkan di kota Port Macquarie-Hastings council. Di kota ini, penerapan sensor dipasang dengan mengintegrasikan meteran air konvensional dengan sensor seperti yang dapat terlihat pada Gambar 4. Di kota ini perangkat dapat membaca data berupa ID pengguna, tanggal, waktu dan nilai pembacaan meteran pada waktu yang telah ditentukan. Data dari unit *Smart Water Management* dikirimkan melalui sinyal radio berenergi rendah dengan menggunakan *output pulse* terkalibrasi yang kemudian meneruskan semua informasi pembacaan meteran air *cloud base* data yang dapat diakses via internet. Data yang telah diunggah ke server tersebut dapat diunduh dalam bentuk format CSV kemudian dapat diunduh melalui jaringan seluler. Data tersebut dapat berguna dalam mengetahui debit rata-rata harian dan kondisi dimana debit air nol maupun tidak nol. Debit air nol dapat mengindikasikan tidak adanya pemakaian, sedangkan apabila debit air tidak nol maka terindikasikan adanya penggunaan air. Debit air nol tersebut merupakan salah satu cara dalam menentukan adanya kebocoran yang terjadi pada sistem perpipaan. Untuk memastikan keakuratannya, unit ini dilakukan kalibrasi ulang secara rutin (Randall & Koech, 2019).



Gambar 4. Ilustrasi unit *Smart Water Meter* yang dipakai di Port Macquarie-Hastingscouncil, Australia

Selain Australia, penerapan teknologi meteran pintar juga telah dikembangkan di salah satu kota di Spanyol, yaitu Alicante. Di kota ini, terdapat dua jenis sistem pengukuran air yang dikembangkan. Untuk lingkup perkotaan, pengembangan dilakukan dengan pemasangan *remote reading device* berupa modul radio dengan antena VHF (*Very High Frequency*) yang mampu memancarkan *free band* 169-megahertz yang mampu menjangkau area yang luas. Setiap antena dapat menerima sinyal dari jarak 1.000 hingga 2.000 m, meskipun antena tersebut siap menerima informasi dari jarak sejauh 5.000 m. Untuk konsumen besar dan daerah yang sulit terjangkau, pengembangan yang dilakukan adalah dengan menggunakan sistem *iMeter*. Sistem *iMeter* ini merupakan SWM yang dapat melakukan pemasangan sistem registrasi, penyimpanan dan transmisi data pelanggan dan mengirimnya ke server perusahaan melalui teknologi GPRS. Untuk pengoperasian, sistem ini ditenagai oleh energi listrik. Dalam pengoperasian di kota ini, tantangan dalam pengembangan SWM adalah cara dalam menyimpan, mengelola dan memproses banyaknya data pemakaian air dari konsumen yang telah didapat. Data-data tersebut dapat diolah dalam mengetahui pola pemakaian air tiap individu, grafik pemakaian air harian. Dengan menggunakan data tersebut, sistem dapat membaca dan mendeteksi apabila terjadinya pemakaian air yang abnormal atau melebihi rata-rata pemakaian konsumen lalu memberikan notifikasi via *smartphone* yang terkoneksi (March et al., 2017). Secara garis besar, pemanfaatan SWM di Alicante memiliki beberapa potensi seperti dapat:

1. Mereduksi kebutuhan air dan mengefisiensikan jaringan air dengan cara mendeteksi kebocoran air secara dini.
2. Efisiensi biaya operasional dibandingkan dengan meteran air secara manual dengan penghematan ekonomi dengan peningkatan efisiensi jaringan, serta pengurangan biaya (sebagian besar biaya tenaga kerja) yang terkait dengan pembacaan meteran.

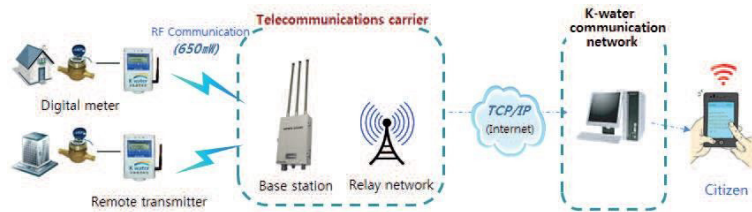
Selain itu pembacaan meteran jarak jauh mungkin tidak hanya berkontribusi untuk mengurangi biaya operasi dan pemeliharaan untuk perusahaan (termasuk pengaturan tekanan air), tetapi juga membantu dalam mendesain skema tarif yang lebih fleksibel seperti memikirkan kembali tarif berdasarkan tipologi pengguna/pola konsumsi atau melalui pembedaan tarif air berdasarkan periode waktu harian atau mingguan.

3. Mengetahui dan memahami pola pemakaian air konsumen yang dapat berguna sebagai informasi dalam perencanaan air serta sebagai cara baru dalam berinteraksi dengan konsumen.
4. Mereduksi konsumsi energi dan emisi karbon (*carbon footprint*) dengan penurunan kebutuhan air yang dapat berkaitan dengan kebutuhan energi yang lebih rendah di instalasi pengolahan air (dan instalasi pengolahan air limbah) dan stasiun pompa karena total aliran total air yang dibutuhkan berkurang.

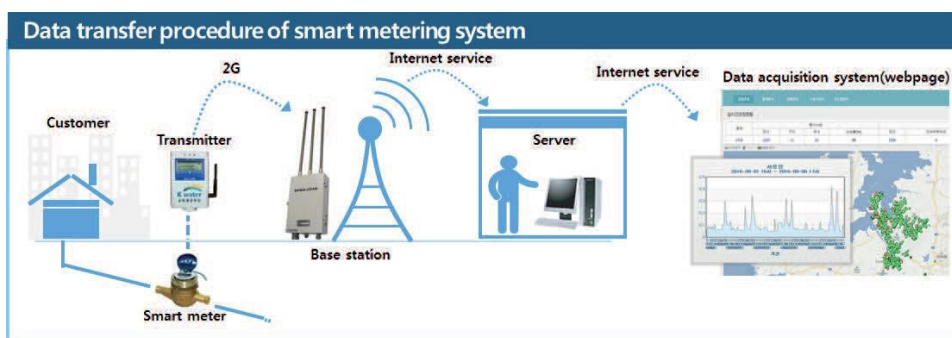
Kota Seosan (Korea Selatan) telah menguji coba pemasangan meteran air pintar (SWM) dengan tujuan untuk agar dapat memperkecil peluang terjadinya kebocoran pada sistem jaringan perpipaan mereka. Prinsip pengukuran memiliki perbandingan dengan kota Port Macquarie-Hastingscouncil, tetapi pengiriman data menggunakan sinyal yang ditransmisikan menggunakan nirkabel jarak jauh untuk pengiriman data ke pusat server seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Nirkabel jarak jauh dipergunakan karena karakteristik area jangkauannya yang lebih luas dan gangguan sinyal yang rendah terhadap sinyal lain. Pemilihan jenis sinyal tersebut didasarkan kepada keuntungannya seperti biaya pemasangan di muka yang rendah, konsumsi listrik yang rendah, dan kemampuan beradaptasi yang tinggi terhadap berbagai teknologi *Internet of Things*. Dengan mengadaptasi teknologi ini, kota Seosan mampu mengidentifikasi beberapa titik kebocoran hanya dalam waktu beberapa bulan setelah proyek tersebut berjalan. Pada proses pemantauannya, kota ini menerapkan konsep *smaller district metered area* (SDMAs) dimana setiap area memiliki sistem pemantauan yang terpisah.

Hal tersebut bertujuan untuk memastikan ketersediaan pasokan air ketika terjadinya kerusakan pada area lain serta agar lebih memungkinkan untuk mengetahui titik kebocoran pada wilayah layanan yang kecil. Oleh karena itu, apabila terjadi kebocoran ditingkat DMA, katup tertentu di jaringan distribusi dapat ditutup dan DMA tersebut kemudian akan dibagi menjadi area yang lebih kecil yang disebut sub-DMA (SDMA) seperti pada Gambar 6. Penggunaan meteran air pintar dapat memantau aliran air di DMA dan SDMA, sehingga memberikan penghitungan aliran malam minimum yang lebih akurat. Selain itu, meteran ini

mengumpulkan data penggunaan air beberapa kali sehari, sehingga pemerintah kota dapat menganalisis rasio air SDMA setiap hari. Berkat kombinasi meteran air pintar dan *district metered area* (DMA), kebocoran pada sistem perpipaan lebih mudah untuk diidentifikasi (*SMART WATER MANAGEMENT Case Study Report Acknowledgements*, 2018).

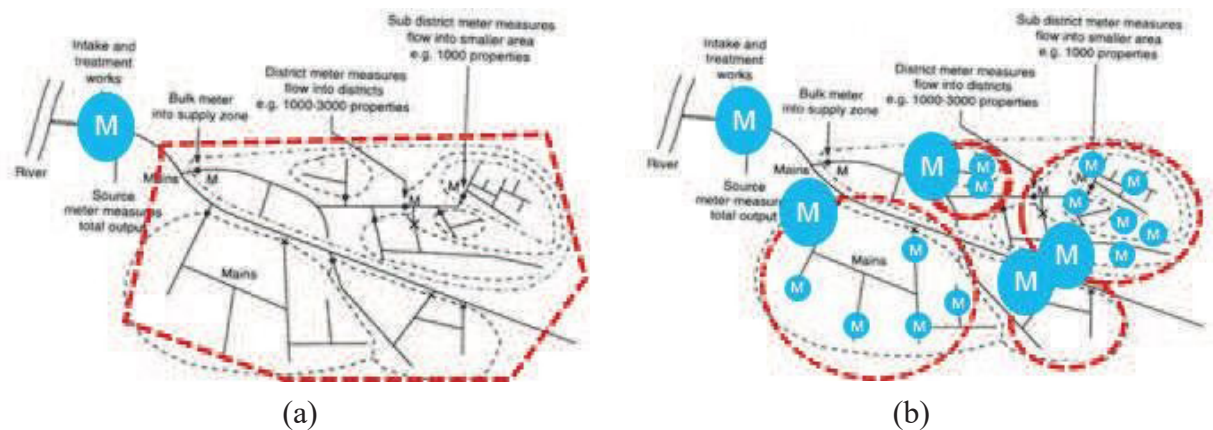


(a)



(b)

Gambar 5. Arsitektur Sistem *Smart Water Meter* di Seosan City, Korea Selatan
 (a) Outline Sistem Yang Diterapkan ke Masyarakat (b) Pemantauan Oleh Perusahaan
 Sumber: (*SMART WATER MANAGEMENT Case Study Report Acknowledgements*, 2018)



(a)

(b)

Gambar 6. Ilustrasi Sistem Pemantauan (a) *District Metered Area* (DMA) dan (b) *Sub District Metered Area* (SDMA) di Seosan City, Korea Selatan
 Sumber: (*SMART WATER MANAGEMENT Case Study Report Acknowledgements*, 2018)

Penerapan SWM di Korea, Spanyol dan Australia telah membantu mempermudah pengumpulan data penggunaan air masyarakat dan mengoptimalkan distribusi air dengan deteksi kebocoran dan prediksi kebutuhan air. Kondisi tersebut menyebabkan biaya operasional IPA dapat lebih efisien serta pengurangan biaya yang berkaitan dengan pembacaan meteran dan membantu mengatur skema pembayaran biaya air pelanggan yang lebih tepat guna. Data penggunaan air tersebut juga dapat berguna sebagai dasar dalam merencanakan peningkatan IPA maupun informasi yang dapat meningkatkan kepercayaan pelanggan.

3.1.2 Regulasi dan standar teknis

3.1.2.1 Peraturan Presiden No. 122 Tahun 2015 Tentang Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM)

SPAM jaringan perpipaan terdiri atas 4 bagian, yaitu unit air baku, unit produksi, unit distribusi, dan unit pelayanan. Unit air baku merupakan sarana pengambilan dan/atau penyedia air baku. Unit produksi merupakan infrastruktur yang dapat digunakan untuk proses pengolahan air baku menjadi air minum melalui proses fisika, kimia, dan/atau biologi.

Unit distribusi merupakan unit yang berupa bangunan penampungan sampai unit pelayanan yang terdiri atas jaringan distribusi dan perlengkapannya, bangunan penampungan dan alat pengukuran dan peralatan pemantauan. Unit pelayanan merupakan unit yang berguna sebagai titik pengambilan air. Di titik ini, harus dipasang alat pengukuran berupa meteran air.

3.1.2.2 Peraturan Menteri Perindustrian No 122 Tahun 2010 Tentang Pemberlakuan Standar Nasional Indonesia (SNI) Spesifikasi Meter Air Minum Secara Wajib

1. Memberlakukan secara wajib SNI Spesifikasi Meter Air Minum sesuai SNI 2547:2008 pada nomor Pos Tarif HS 9028.20.10.00.
2. Meter air minum dengan Pos Tarif HS 9028.20.10.00 yang diberlakukan SNI Spesifikasi Meter Air Minum Secara Wajib merupakan alat untuk mengukur jumlah aliran air yang mengalir secara terus menerus melalui sistem kerja peralatan yang dilengkapi dengan unit sensor, unit penghitung, dan indikator pengukur untuk

menyatakan volume air yang lewat dengan ukuran diameter nominal lubang masuk air maksimum 50 mm.

3. Produk meter air Minum dinyatakan sesuai SNI 2547:2008 apabila telah lulus uji dengan menggunakan metode pengujian SNI 2418.3:2009.

3.1.2.3 Standar Meter Air Minum (SNI 2547:2008)

1. Persyaratan Teknis Umum
 - a. Meter air harus dibuat dari bahan yang mempunyai kekuatan yang baik tahan lama dan mempunyai umur pakai yang lama.
 - b. Bahan meter air tidak boleh terpengaruh oleh temperature air
 - c. Semua bagian meter air yang bersentuhan dengan air yang mengalir harus dibuat dari material tidak beracun.
 - d. Untuk meter air debit nominal (Q3) < 15 m³/jam material untuk meter air (badan, kepala/ring, kopleng, kopleng ring) jika dibuat dari bahan kuningan harus mengandung Cu > 63%, Zn < 33 % , Pb < 3 % atau jika dibuat dari bahan plastik harus dilengkapi dengan bahan anti ultraviolet, dikombinasikan dengan plat logam didalamnya.
 - e. Meter air harus dibuat dari bahan yang tahan korosi baik internal maupun eksternal atau dilindungi dengan coating/pelapis yang sesuai dengan bahan yang tahan terhadap korosi.
 - f. Alat penunjuk meter air harus dilindungi dengan jendela tembus pandang bari bahan kaca dan dilengkapi dengan penutup atau pengaman.
 - g. Meter air harus dilengkapi dengan anti magnet dan harus ditempatkan pada bagian yang kedap air atau dibungkus/dilindungi secara menyeluruh kedap air.
 - h. Meter air dirancang sedemikian rupa sehingga dapat dibongkar pasang antara inner dan rumah meter air untuk keperluan perbaikan.
 - i. Kehilangan tekanan maksimum < 0,025 Mpa (0,25 bar)
 - j. Kesalahan maksimum 5%
 - k. Tidak boleh terjadi aliran arus balik
 - l. Tekanan kerja minimal 1Mpa (10 bar) kecuali pipa diameter >500 mm sebesar 6 bar
 - m. Rentang temperatur kerja 5 - 55oC dengan kelembapan 0 – 100% pada suhu 40oC (khusus untuk pembacaan jarak jauh minimal 93%)

- n. Apabila alat membutuhkan sumber tenaga, maka mampu beroperasi diatas rentang voltas pada – 15% sampai + 10% dari sumber voltase a.c. atau d.c. dan $\pm 2\%$ pada frekuensi nominal dari sumber tenaga a.c.
 - o. Kesalahan resolusi dari alat penunjuk tidak melebihi 0,5%
 - p. Tahan terhadap pengaruh magnet hingga 2500 gauss tanpa kesalahan pembacaan maksimum
2. Persyaratan Teknis Lainnya
- a. Meter air yang dibuat harus disegel sebagai pengaman teknis
 - b. Meter air yang di buat harus diberi tanda verifikasi dengan jelas dan kasat mata tanpaharus membongkar meter air.
 - c. Meter air perlu dilindungi dengan alat pelindung tertentu sebagai jaminan.
 - d. Alat penunjuk volume pada meter air harus berfungsi dan mudah dibaca, tepat dan tidak meragukan terhadap penunjukan volume. Alat penunjuk harus mempunyai alat visual untuk pengujian dan kalibrasi secara manual maupun otomatis.
3. Sumber Tenaga
- Sumber tenaga yang digunakan dalam meter air dengan peralatan elektronik dapat berupa tenaga eksternal; baterai yang tidak bisa diganti; maupun baterai yang dapat diganti.
4. Pengujian Kinerja untuk Meter Air dengan Alat Elektronik
- Uji kinerja bertujuan untuk memverifikasi meter air dengan alat elektronik dapat dilaksanakan dan berfungsi sebagai kondisi yang ditetapkan. Setiap pengujian indikasi jikasesuai kondisi referensi digunakan sebagai penentu kesalahan hakiki.
- a. Tingkat terburuk, meter air dengan alat elektronik dibagi menurut kelas dan kondisi lingkungan terdiri meter air yang dipasang permanen, dalam bangunan atau rumah serta meter air yang *mobile*.
 - b. Kondisi referensi, untuk uji kinerja meter air harus sebagai berikut :
 - i. Temperatur udara ambient : $20^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$
 - ii. Kelembaban : $60\% + 15\%$
 - iii. Tekanan udara ambient : 86 Kpa
 - iv. Voltase penggerak : Voltase nominal + 5 %
 - v. Frekwensi : Frekwensi nominal + 2 %
 - c. Kesepakatan, harus dibuat ketika dilakukan verifikasi dan pengujian yang ditetapkandalam meter air elektronik

5. Satuan Ukuran, Simbol dan Penempatan
 - a. Volume air yang diukur harus dinyatakan dalam meter kubik. Satuan m³ harus terdapat pada alat pengukur dengan angka yang ditampilkan.
 - b. Persyaratan warna untuk alat penunjuk pada meter air. Hitam untuk menunjukkan meter kubik, merah untuk sub kelipatan meter kubik. Warna tersebut harus digunakan pada jarum penunjuk atau angka.
 - c. Resolusi alat penunjuk tidak melebihi 0,5 % pada volume aktual pengukuran selama uji dalam waktu tidak lebih dari 1 jam 30 menit.
 - d. Elemen verifikasi tambahan tidak lebih besar dari 0,5 % pada uji volume dan alat penunjuk berfungsi sebagai pengoreksi.
 - e. Pada meter air elektronik, alat penunjuk harus mempunyai kemampuan untuk membaca volume yang diukur, terang, jelas dan tanpa diulang

3.1.3 Parameter dan Sensor

Perlengkapan meteran air saat ini telah diproduksi dan tersedia dari dalam negeri maupun luar negeri dengan spesifikasi yang bermacam-macam. Untuk saat ini umumnya perangkat meteran air produksi dalam negeri masih belum teknologi perangkat pintar dan masih belum koneksi jaringan internet. Walaupun belum terkoneksi dengan jaringan internet, perangkat yang diproduksi dalam negeri sudah memiliki kemampuan yang mampu mendukung penggunaan teknologi pintar. Di lain sisi, saat ini perangkat meteran air yang telah disediakan perusahaan luar negeri memiliki teknologi yang lebih baik dibandingkan dalam negeri seperti memiliki koneksi dengan jaringan internet, pengiriman dan penyimpanan data, hingga deteksi kebocoran pada jaringan perpipaan.

Untuk saat ini, meteran air pintar tersedia dalam bentuk seperti *smart prepaid meter*, *smart postpaid meter* dan *smart water read*. *Smart prepaid meter* merupakan jenis meteran air yang mampu membuat masyarakat hanya mampu mendapat akses air secara “pra bayar” dimana masyarakat perlu membayar air sebelum dipakai untuk mendapatkan kuota sebesar beberapa m³ bergantung biaya yang dibayarkan. Apabila kuota terlewati, alat otomatis akan mematikan aliran. *Smart postpaid meter* sendiri merupakan meteran air pintar menerapkan sistem “pasca bayar” sehingga alat ini memiliki kemampuan untuk mengirimkan data kepada instalasi sehingga biaya penagihan air menjadi lebih akurat. *Smart water read* sendiri merupakan aksesoris meteran air yang dapat dipasangkan kepada meteran air yang mendukung sehingga membuat meteran air konvensional dapat menjadi

meteran air pintar tanpa melakukan penggantian meteran air. Adapula terdapat beberapa meteran air yang tersedia dipasaran produksi dalam negeri dan luar negeri yang tertera pada Lampiran 5.

3.2 Smart Water Quality Monitoring (SWQM)

Pada sub – bab ini akan dibahas terkait pedoman literatur SWQM di berbagai negara, jenis parameter dan sensor yang biasa digunakan dalam SWQM, dan regulasi terkait SWQM.

3.2.1 *State of the art*

Berkembangnya teknologi menyebabkan terjadinya berbagai peningkatan di sektor monitoring kualitas air. Salah satunya adalah penerapan sensor sebagai cara dalam memonitoring kualitas air. Sebelum menerapkan teknologi sensor, sistem pengujian kualitas air konvensional memiliki beberapa keterbatasan dalam melakukan monitoring kualitas air karena spatiotemporal yang tinggi variabilitas parameter fisiokimia dan/atau mikroba air. Untuk memonitoring kualitas air, umumnya digunakan parameter-parameter seperti suhu, pH, conductivity, kekeruhan, and DO.

Untuk saat ini, telah dikembangkan teknologi *Wireless Sensor Networks* (WSNs) dengan kelebihan yang seperti ukurannya yang relative kecil dan murah serta memiliki kemampuan penginderaan, pemrosesan, dan transmisi mengenai fenomena lingkungan. Tiap node sensor dapat merasakan, mengukur, dan mengumpulkan informasi dari lingkungan dan, berdasarkan beberapa proses keputusan lokal, serta dapat mengirimkan data yang diindera ke pengguna. Dalam tiap node sensor biasanya terdiri dari beberapa bagian seperti transceiver radio dengan antena internal atau koneksi ke antena eksternal, mikrokontroler, sirkuit elektronik untuk berinteraksi dengan sensor, dan sumber energi yang dapat berasal dari baterai atau alat yang dapat mendapatkan energi secara otomatis (Yick et al., 2008).

Dari segi pengembangannya, terdapat dua tipe WSNs, yaitu terstruktur dan tidak terstruktur. Perbedaan dari kedua jenis pengembangan ini terletak pada kepadatan node sensor yang dipasang. Pada pelaksanaannya, tiap node mungkin digunakan secara ad hoc di lapangan. Saat setelah digunakan jaringan WSN tersebut dibiarkan tanpa pengawasan untuk melakukan fungsi pemantauan dan pelaporan. Tipe tidak terstruktur memiliki kendala

pada pemeliharaan jaringan seperti mengelola konektivitas dan mendeteksi kegagalan sulit dilakukan karena ada begitu banyak node. Dalam WSN terstruktur, semua atau beberapa node sensor digunakan dengan cara yang telah direncanakan sebelumnya. Keuntungannya dari jaringan terstruktur adalah bahwa lebih sedikit node yang dapat digunakan dengan jaringan yang lebih rendah biaya pemeliharaan dan manajemen.

Dalam kegiatan pemantauan kualitas air perlu adanya parameter-parameter yang diukur sehingga sensor yang dipasang dapat ditentukan dengan lebih akurat. Untuk saat ini, terdapat beberapa parameter yang umum digunakan untuk memantau kualitas air seperti pada Tabel 4. Selain parameter yang dipantau, pada penggunaannya sensor yang dipakai harus dapat dengan mudah dikalibrasikan dilapangan dengan baik dan benar.

Salah satu negara yang menerapkan teknologi adalah Belanda melalui perusahaan Vitens telah berhasil mengembangkan teknologi pemantauan kualitas air berbasis ICT (*Information and Communication Technology*) di beberapa kota yang menjadi uji coba mereka di Provinsi Friesland lebih tepatnya yakni Leeuwarden, Dokkum, dan Drachten dalam program VIP (*Vitens Innovative Playground*).

Dalam penggunaan sensor, perusahaan ini bekerja sama dengan perusahaan EventLab dengan konsep sensor optik generik yang mengukur perubahan *refractive index* (RI) permenit dalam air menggunakan prinsip Mach Zehnder Interferometri (MZI). *refractive index* ini menilai indikator general kualitas air seperti substansi di dalamnya lewat perubahan RI pada matriks air. Sensor ini kemudian dapat dioperasikan pada level sensitifitas 10^{-7} kemudian data tersebut dapat dikonversi menjadi konsentrasi kontaminan dengan satuan ppm.

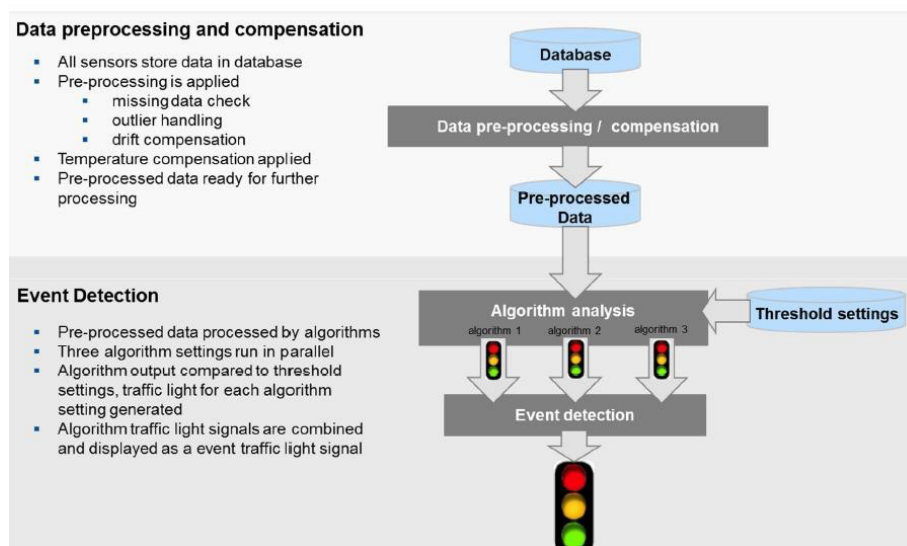
Untuk memonitoring kualitas air, penempatan sensor dibagi atas beberapa lokasi seperti sumber air (IPA dan stasiun pompa), titik utama distribusi (menara air, reservoir, pompa booster), dan jaringan distribusi pelanggan (perumahan, rumah sakit, dll). Penentuan pemasangan sensor pada pelanggan didasari kepada banyaknya pemakaian air, jarak dari pipa distribusi utama, dan perizinan pelanggan untuk berpartisipasi dalam pengembangan pasokan air. Pengoperasian sensor dalam jaringan distribusi terdapat tantangan utama seperti memisahkan variasi kualitas air alami dan operasional dari peristiwa kualitas air yang tidak biasa.

Tabel 4 Parameter yang Umum Dipakai Dalam Monitoring Kualitas Air

Parameter	Uraian
pH	Konsentrasi efektif ion hidrogen di air. Nilai pH dapat menentukan asam/basa dari air. Selain itu, pH dapat menjadi salah indikasi pencemar maupun kualitas air seperti adanya pengaruh dari <i>Carbon dioxide/bicarbonate/carbonate</i> dan <i>ammonia/ammonium</i> (Environmental Protect Agency USA, 2009).
Temperatur	Temperatur dapat mempengaruhi beberapa parameter lain seperti DO dan konduktivitas yang berubah tergantung suhu air atau aktivitas kimiawi dan biologis yang dipengaruhi oleh temperatur air (Environmental Protect Agency USA, 2009).
Kekeruhan	Partikel padatan (partikel atau koloid) yang terkandung dalam air yang dapat mengganggu transmisi cahaya di air.
<i>Total Dissolve Solid (TDS)</i>	Jumlah garam anorganik atau partikel organik kecil yang terlarut di air.
Konduktivitas/ <i>Electrican Conductivity (EC)</i>	Kemampuan air dalam menghantarkan arus listrik akibat dari terdapatnya padatan terlarut atau zat kimia anorganik yang menghantarkan listrik.
<i>Residual Chlorine Detection (RCD)</i>	Jumlah klorin yang masih tersisa setelah proses disinfeksi dengan klorin.
<i>Dissolve Oxygen (DO)</i>	Konsentrasi oksigen yang terlarut dalam air dapat berfungsi sebagai indikator aktivitas kimia dan biokimia dalam air (Environmental Protect Agency USA, 2009). Semakin besar nilai DO, maka kualitas air akan semakin bagus, namun nilai DO perlu diatur karena apabila nilainya terlalu besar, maka dapat menyebabkan pengkorosian pada sistem perpipaan, apabila terlalu rendah maka dapat menimbulkan baupada air (Atlas Science Environmental Robotic, 2022).
<i>Oxidation Reduction Potential (ORP)</i>	Tingkat kemampuan suatu cairan dalam membunuh bakteri didalam air tersebut. Semakin tinggi nilai ORP maka akan semakin cepat waktu yang dibutuhkan cairan tersebut dalam membunuh bakteri. Nilai ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk pH dan suhu. Parameter ORP sangat berguna dalam mengetahui tingkat efektivitas disinfeksi. Jika air di disinfeksi memakai Chlorine atau oksidator kuat lainnya, alat ukur menunjukkan hasil (+) dan air memiliki kandungan yang mampu menghancurkan mikroba didalamnya, jika hasil masih menunjukkan (-) maka dapat dipaktikan proses oksidasi yang merupakan sebuah proses membunuh bakteri tidak dapat bekerja maksimal serta menandakan bawah banyak organisme atau kontaminan yang mengkonsumsi oksigen larut (DO) dalam air (Patrick, 2023).

Proses monitoring dapat dilakukan dengan dengan tiap jenis sensor yang mengukur parameter dan menyimpannya dalam bentuk data. Data tersebut kemudian akan disimpan di basis data pusat lalu diproses terlebih dahulu sebelum digunakan untuk pensinyalan peristiwa. Data yang didapat kemudian di konversi terhadap hasil pembacaan suhu, integritas data diverifikasi seperti penghilangan penyimpangan maupun koreksi data dan titik data yang hilang diidentifikasi dan dilengkapi menggunakan ekstrapolasi. Data tersebut kemudian diproses oleh sistem deteksi yang mendeteksi perubahan komposisi air seperti pada Gambar 7. Pemrosesan perubahan data dilakukan dengan menggunakan algoritma pendeteksian peristiwa. Masing- masing algoritma menargetkan jenis dinamika kualitas air yang berbeda (misalnya perubahan cepat vs perubahan lambat). Sinyal peristiwa gabungan kemudian dihasilkan dengan menggabungkan hasil dari masing-masing algoritma menggunakan aturan bersyarat seperti pada Gambar 8.

Dasar dari deteksi peristiwa adalah menetapkan pengaturan dasar menggunakan data historis. Ambang batas dapat ditetapkan berdasarkan kumpulan data historis jangka panjang saja (dengan ambang batas tetap) atau dengan menggabungkannya dengan riwayat singkat titik data dalam rentang waktu yang bergerak (ambang batas dinamis). Selanjutnya, hasil untuk data online dari deteksi peristiwa dibandingkan dengan nilai ambang batas dan nilai yang melebihi ambang batas dianggap sebagai peristiwa. Ketika batas ambang terlampaui, komposisi air telah berubah di luar variasi alami yang diharapkan, dan alami yang diharapkan, dan suatu peristiwa ditandai.



Gambar 7. Skema Pemrosesan Data Hingga Menjadi Sistem Peringatan Awal Mengenai Kualitas Air

Sumber: (Williamson et al., 2014)



Figure 3: Example of combined event signal logic; ■ Green (OK) ■ Orange (Level 1) ■ Red (Level 2).

Gambar 8. Kombinasi Logika Dari Beberapa Algoritma Dalam Pendeteksian Suatu Kondisi

Sumber: (Williamson et al., 2014)

3.2.2 Regulasi dan Standar Teknis

Tiap daerah memiliki standar baku mutu air minum yang berbeda-beda bergantung kepada kebijakan dari tiap daerah. Di Indonesia, standar baku mutu air minum telah ditetapkan pada Peraturan Menteri Kesehatan No 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan. Selain di Indonesia, secara garis besar WHO telah menetapkan dokumen terkait baku mutu kualitas air yang tertuang pada dokumen WHO *Guideline for Drink Water Quality 2022*. Sebagai perbandingan, Amerika Serikat juga telah memiliki dokumen terkait baku mutu kualitas air minum yang tertera pada dokumen USEPA Drink Water Standard 2018. Dengan mengacu kepada baku mutu air minum di Indonesia, maka dapat terlihat beberapa perbedaan maupun kesamaan antar baku mutu seperti yang terlihat pada Tabel 5.

Tabel 5 Perbandingan Baku Mutu Wajib Kualitas Air Wajib di Indonesia Terhadap WHO dan Amerika Serikat (USEPA)

Parameter	Nilai Maksimal Baku Mutu			Satuan
	Permenkes No2 Tahun 2023	USEPA Drink Water Standard 2018	WHO Guidelinefor DrinkWater Quality2022	
Heterotrophic Plate Count (HPC)	-	NA	0	CFU/100 ml
Mycobacteria	-	-	0	CFU/100 ml
E Coli	0	-	0	CFU/100 ml
Total Coliform	0	0	0	CFU/100 ml
Virus	-	0	0	CFU/100 ml
Kimia Anorganik				
Arsen	0,01	0,01	0,01	mg/L
Florida	1,5	2	1,5	mg/L
Kromium Heksavalen	0,01	0,003	0,05	mg/L
Kadmium	0,003	0.005	0,003	mg/L
Nitrit	3	1	3	mg/L
Nitrat	20	10	50	mg/L
Sulfat	-	250 (Timbulrasa) 500 (Dampak Kesehatan)	250	mg/L
Fisik				
Korosifitas		Tidak Korosif		
Bau	tidak bau		tidak bau	-
Warna	10	15	15	TCU
TDS	300	500	600	mg/L
Kekeruhan	3	NA	4	NTU
Suhu	Suhu udara 3	-	Lingkungan	oC
Kimiawi				
Silver (Perak)	-	0,1	0,1	mg/L
Copper (Perunggu)	-	1	2	mg/L
Klorida	-	250		mg/L
Alumunium	0,2	0,2	0,2	mg/L
Besi	0,2	0,3	0,5	mg/L
Mangan	0,1	0,05	0,08	mg/L
pH	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5	-
Timbal	0,01	0	0,01	mg/L
Hasil Sampingan				
Sisa Klorin	0,2 - 0,5	4	5	mg/L

Sumber: (Olahan Penulis 2023)

Berdasarkan perbandingan tersebut, terlihat bahwa dari pemantauan dari segi kualitas mikroorganisme dalam air pada Permenkes hanya memantau 2 jenis mikroorganisme yaitu coliform dan total coliform sedangkan WHO dan USEPA membahas parameter mikroorganisme lebih detail. Dari segi parameter fisik Permenkes memiliki baku mutu fisik yang lebih ketat pada beberapa parameter seperti TDS, warna, dan kekeruhan dan hanya USEPA yang membahas parameter korosifitas. Apabila dibandingkan dari segi parameter kimiawi, Permenkes memiliki parameter yang lebih sedikit dibandingkan dengan baku mutu lainnya seperti tidak adanya pembahasan mengenai parameter perak, perunggu, klorida, dan sulfat. USEPA memiliki keketatan yang lebih pada parameter kromium heksavalen nitrit dan nitrat, sedangkan Permenkes memiliki keketatan yang lebih pada parameter sisa klorin dan besi walaupun mangan memiliki keketatan yang lebih longgar dibandingkan baku mutu lainnya.

Selain parameter wajib, dalam permenkes juga terdapat parameter khusus yang menyesuaikan lokasi lokasi penyediaan air minum. Pembangunan IKN dilakukan di sekitaran kawasan hutan industri sehingga baku mutu parameter khusus yang sesuai merupakan daerah perkebunan, pertanian, dan kehutanan. Tabel 6 merupakan perbandingan parameter khusus pada Permenkes terhadap Amerika Serikat (USEPA) dan WHO.

Tabel 6 Perbandingan Baku Mutu Khusus Kualitas Air Wajib di Indonesia Terhadap WHO dan Amerika Serikat (USEPA)

Parameter	Nilai Maksimal Baku Mutu			Satuan
	Permenkes No 2 Tahun 2023	USEPA Drink Water Standard 2018	WHO Guideline for Drink Water Quality 2022	
Amoniak	1,5	-	1,5	mg/L
Fosfat	0,2	-	-	mg/L
Benzena	0,01	0.005	0,01	mg/L
Toluena	0,7	1	0,7	mg/L
Aldrin	0,00003	-	0.00003	mg/L
Dieldrin	0,00003	-	0.00003	mg/L
Karbon Organik (Total)/Hidrokarbon Polyaromatis	0,0007	0	0.0006	mg/L

Berdasarkan hasil pengamatan, sebagian besar parameter khusus yang tertera pada Permenkes memiliki nilai yang menyerupai baku mutu yang ditetapkan oleh WHO. Dalam Permenkes terdapat 32 zat kimia lain dengan nilai NA (tidak tersedia) yang sebagian besar diantaranya merupakan produk yang umum dipakai di pertanian maupun perkebunan seperti pestisida, herbisida, insektisida dsb.

3.2.3 Parameter dan Sensor

Pada saat ini, sensor pemantauan kualitas air saat ini masih baru dapat memantau parameter umum kualitas air. Oleh sebab itu polutan-polutan berbahaya masih memungkinkan untuk memasuki badan air dan tidak terpantau. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dapat dilakukan pendekatan deteksi polutan pada badan air seperti dengan melihat pengaruh tiap jenis polutan terhadap parameter umum. Untuk saat ini, terdapat beberapa jenis polutan yang telah diuji pengaruhnya terhadap beberapa parameter umum seperti yang terlihat pada Tabel 7. dengan mengetahui pengaruh polutan terhadap parameter umum, maka keamanan kualitas air minum dapat dijaga dan apabila terjadi indikasi yang sesuai dengan korelasi antar parameter maka dapat dilakukan tindak lanjut seperti pengujian lab hingga penghentian distribusi secara sementara.

Berkembangnya teknologi sensor menyebabkan semakin banyaknya jenis sensor yang tersedia di pasaran dengan keakuratan, resolusi, jangkauan baca dengan menggunakan metode pengujian yang bermacam-macam. Oleh sebab itu, banyak perusahaan yang tengah mengembangkan sensor *monitoring* kualitas air. Untuk saat ini terdapat beberapa spesifikasi sensor yang tersedia di pasaran dari beberapa merek yang berbeda-beda seperti yang terlihat pada Lampiran 6.

Tabel 7 Hubungan Antar Parameter Terhadap Polutan

Type	Warfare Agent	Free Chlorine	Total Chlorine	Chloride	ORP	TOC	pH	DO	NO ₃ -N	NH ₃ -N	Turbidity	Conductivity
Pesticide	Aldicarb	↓↓	↓↓	↑	~	N/A	~	~	N/A	N/A	↑↑	~
	Nicotine	↓↓	↓↓	↑	↑	↑↑	~	↑	↑	N/A	↑↑	~
	Sodium Arsenite	N/A	↓↓	↑↑	↓↓	N/A	~	N/A	↑	↑	↑↑	~
Herbicide	Glyphosate	↓↓	↓↓	↑	~		↓	↑	↑	↑	↑↑	~
	Dicamba	↓	~	↓	~	N/A	~		N/A	N/A	↓	~
Insecticide	Mercuric Chloride	↓	↓	↓	~	N/A	~	↓	N/A	N/A	↑↑	~
	Malathion	N/A	↓	↓	↓	↑↑	~	N/A	↑	↑	↑↑	~
	Phorate	N/A	↓	N/A	↓	↑↑	~	N/A	↑↑	↓	↑↑	~
Other	Sucrose	↓	~	~	↑	N/A	~	↓	N/A	N/A	↑↑	~
	Wastewater	N/A	↓	N/A	↓	~	~	N/A	↑↑	↑	↑↑	~
	Colchicine	↓	↓	↓	~	N/A	~	↓	N/A	N/A	↑↑	~
	Dimetil Sulfoxide	↓↓	↓↓	~	~	N/A	~	↓	N/A	N/A	↑	~
	Lead Nitrate	↓	↓	↓	~	N/A	~	↓	N/A	N/A	↑↑	~
	Sodium Thiosulfate (Anhydrous)	↓↓	↓↓		↓	N/A	~	↓	N/A	N/A	↑↑	~
	Potassium Ferricyanide	↓	↑	↑↑	~	N/A	~	~	N/A	N/A	↑↑	~
Biological	Nutrient Broth	↓↓	↓	↑	↓	N/A	~	~	N/A	N/A	↓↓	~
	Trypticase Soy Broth	↓↓	↓↓	↓	↓	N/A	~	~	N/A	N/A	↑	~
	Terrific Broth	↓↓	↓	↓	↓	N/A	~	~	N/A	N/A	↓	~
	E.coli in Terrific Broth	↓↓	↓↓	↑	↓	N/A	~	~	N/A	N/A	↑↑	~

3.3 Smart Rain and Stormwater Management (SRSM)

Pada sub – bab ini akan dibahas terkait pedoman literatur SRSM di berbagai negara, jenis parameter dan sensor yang biasa digunakan dalam SRSM, dan regulasi terkait SRSM.

3.3.1 State-of-the-art

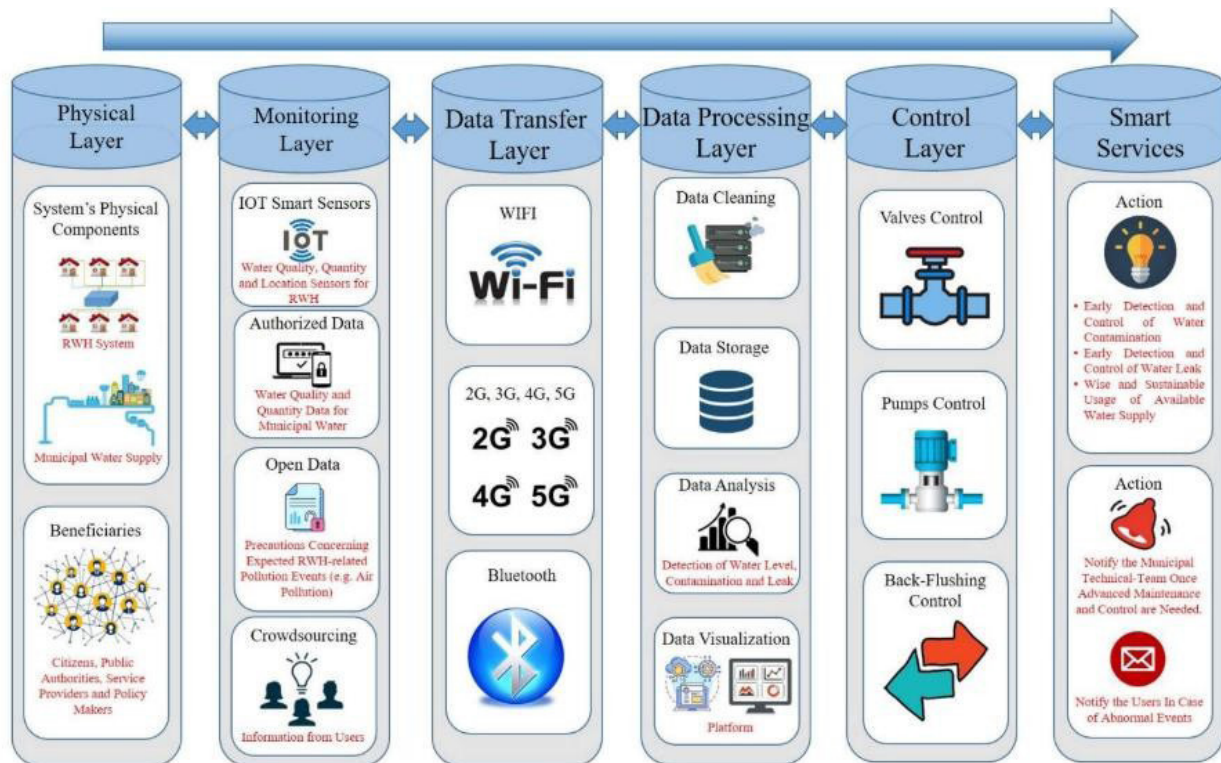
Pemanfaatan air hujan termasuk ke dalam kategori *nature-based solutions* (NBS) yang pada umumnya dilaksanakan dengan konsep terdesentralisasi (Oberascher et al., 2022). Pada mulanya, pemanfaatan air hujan bertujuan untuk memenuhi kebutuhan air bersih. Seiring berkembangnya waktu dan teknologi, dimensi pemanfaatan air hujan berkembang dari pemenuhan kebutuhan air bersih menjadi instrumen pengendalian ketahanan pasokan air, *groundwater recharge*, mitigasi dan pengendalian banjir, hingga mitigasi dan pengendalian bencana iklim (e.g., modifikasi kondisi iklim skala mikro, mitigasi kekeringan) (Campisano et al., 2017) yang kemudian dapat menjawab permasalahan akibat tata kelola air perkotaan yang terdampak urbanisasi. Pemanfaatan air hujan dapat menjadi solusi atas permasalahan urbanisasi yang dihadapi perkotaan. Dampak urbanisasi menjadikan kondisi kota rawan akan bencana yang berkorelasi dengan tata kelola air seperti perubahan aliran hidrologi akibat menurunnya luas bidang resapan, penurunan kualitas air, erosi pada saluran air, hingga degradasi pada habitat sungai (Lim & Lu, 2016). Kondisi tersebut berkorelasi erat dengan peningkatan debit limpasan air hujan dan debit puncak, kenaikan laju aliran, dan menurunnya debit infiltrasi air yang berakibat pada penurunan angka *groundwater recharge* (Lim & Lu, 2016).

Dalam konteks *Smart Rainwater Harvesting* (*Smart RWH*), terdapat empat tujuan utama dari penggunaan sistem *smart RWH* yaitu mendeteksi kontaminasi air dan kebocoran air, mengendalikan kontaminasi dan kebocoran air, memenuhi kebutuhan air domestik, serta mewujudkan penggunaan sumber daya air yang bijak dan berkelanjutan (Judeh et al., 2022). Sistem tersebut setidaknya memungkinkan untuk melakukan pengumpulan data, *user interaction*, dan mengendalikan peralatan *smart system* (e.g., pompa, katup/*valves*, dan lainnya). Terdapat enam komponen atau lapisan dalam sistem *smart RWH*, yaitu (Judeh et al., 2022):

1. *Physical Layer*: terdiri atas komponen fisik dari sistem *water harvesting*, sistem pemenuhan kebutuhan air domestik (*municipal water supply*), dan pengguna
 - a. *RWH quantity group*: merupakan sistem pengumpulan pada RWH, meliputi atap

- bangunan, *gutters*/talang air, tangki RWH, tangki penampungan air bangunan (*household water tank*), jaringan distribusi RWH (dengan alur yaitu mulai dari atap → tangki RWH → *household water tank*), katup/*valves*, pipa *overflow*, pompa, *backflow preventer*, sistem pemenuhan kebutuhan air domestik, dan *control panel*
- b. *RWH quality group*: merupakan sistem mitigasi kontaminasi pada RWH, meliputi sistem penyaringan pada inlet, *first flush diverter*, *RWH tank screen*, *overflow pipe screen*, unit pengolahan (untuk mengolah menjadi *potable water* bila dibutuhkan), pipa pembuangan, dan unit pembilasan
 - c. *Beneficiaries group*: merupakan pihak yang menggunakan dan terdampak dari penggunaan sistem *smart RWH* yaitu *user*, penyedia jasa, pemerintah (*public authorities*), dan pengambil kebijakan
2. *Monitoring Layer*: terdiri atas sensor yang digunakan untuk memantau kualitas air, laju air (*water flow metering*), dan *water level* pada tangki penampungan
 - a. Sistem pengumpulan data kuantitas RWH: berfungsi untuk memantau *water flow*, *water level*, dan kebocoran. Meliputi *smart water flow meter* (pemantauan *water flow* pada jaringan), *water level sensor* pada tangki penampungan, dan *leak detection sensor*
 - b. Sistem pengumpulan data kualitas RWH: berfungsi memantau kualitas air pada sistem RWH. Meliputi sensor pemantauan kualitas air, *crowdsourcing*, *open data*, dan otorisasi data (*authorized data*)
 - c. *Data transfer*: Proses transmisi menggunakan jaringan nirkabel seperti Wi-Fi, *bluetooth*, hingga 4G
 3. *Data Transfer Layer*: terdiri atas sistem nirkabel (*wireless technology*) untuk mentransmisikan data dari sistem pemantauan (*water meters*, sensor IoT, perangkat/*devices*, *crowdsourcing*, *open data*, dan *authorized data*) secara *real-time* ke *server RWH* untuk diproses dan dianalisis lebih lanjut.
 4. *Data Processing Layer*: mengoperasikan *data cleaning*, *data storage*, *data analysis*, dan *data visualization*
 - a. *Data Cleaning*: berfungsi memastikan data yang ada adalah benar, konsisten, dan dapat digunakan. Meliputi pendeteksian dan koreksi data yang tidak tepat dalam catatan pada *database*
 - b. *Data Storage*: proses penyimpanan dan pengintegrasian data yang terkumpul ke dalam satu lokasi penyimpanan (*database*). Memastikan akses, manipulasi, dan *data calling* aman dari gangguan (misal menggunakan “XQuery”)

- c. *Data Analysis*: proses konversi data yang telah terkumpul, dibersihkan, dan disimpan menjadi informasi yang dapat digunakan untuk mengetahui kondisi tertentu maupun mengambil keputusan.
5. *Control Layer*: terdiri atas sistem pengendalian RWH seperti pompa hingga katup/*valves*
Smart Services: terdiri atas sistem pendeteksi kontaminasi air, kebocoran air, *smart control* dan eliminasi kontaminan air, hingga sistem optimalisasi pengisian tangki penampungan



Gambar 9. Arsitektur Umum dari Sistem Smart RWH

Sumber: (Judeh et al., 2022)

3.3.1.1 Karakteristik Air Hujan

Dalam hal menentukan sistem pengolahan air hujan, perlu dipertimbangkan kualitas air hujan yang akan diolah dikarenakan karakteristik air hujan akan menentukan penerapan teknologi pengolahan untuk mencapai target kualitas air olahan yang dituju. Karakteristik air hujan berbeda antar wilayah yang dipengaruhi aktivitas masyarakat, kondisi lingkungan, hingga kondisi iklim. Dalam penelitian yang dilakukan di wilayah Malaysia Timur, nilai konsentrasi Zink dan klorida yang tinggi dalam air hujan diakibatkan karena kawasan tersebut berdekatan dengan Laut Natuna Utara (Laut Cina Selatan) dan banyaknya rumah masyarakat dengan material atap yang terbuat dari seng (Abdullah et al., 2022). Sedangkan

pada penelitian lain yang dilakukan di Hanoi, Vietnam menunjukkan adanya konsentrasi *coliform* yang tinggi. Hal tersebut diakibatkan karena adanya akumulasi pengotor di atap rumah (e.g., akumulasi mikroorganisme, debu, daun, kotoran hewan, dan kontaminan lainnya) selama musim kemarau pada periode November-Ini yang kemudian terbawa pada saat hujan turun (Lee et al., 2017). Berikut merupakan karakteristik air hujan dari berbagai literatur terkait.

Tabel 8. Karakteristik Air Hujan dari Berbagai Lokasi

No	Parameter	Unit	Karakteristik Air Hujan		
			Poznań, Poland (Mazurkiewicz et al., 2022)	Hanoi, Vietnam (Lee et al.,2017)	Malaysia Timur (Serawak, Sabah) (Abdullah et al., 2022)
1	pH	–	4.56–7.72	7.6	5.27
2	Temperature	°C	–	–	–
3	Kalsium	mg/L	0.29–2.29	–	3.53
4	Magnesium	mg/L	0.35–2.26	–	2.08
5	<i>Total alkalinity</i>	mval/L	0.14–0.40	–	–
6	DO	mg/L	4.20–9.00	–	–
7	BOD	mg/L	0.05–0.30	–	–
8	Kesadahan	mg/L	7.00–10.50	20	–
9	<i>Acidity</i>	mval/L	1.00–1.25	–	–
10	Konduktivitas	µS/cm	20.00–38.00	–	0.95
11	Amonia	mg/L	0.037–0.089	–	9.64
12	Nitrit	mg/L	0.018–0.028	0.23	–
13	Nitrat	mg/L	0.021–0.096	0.33	6.16
14	Klorida	mg/L	5.20–10.00	–	22.18
15	<i>Coliform</i>	CFU/100 mL	5–60	270	–
16	<i>Psychrophilic bacteria</i>	CFU/1 mL	360–7500	–	–
17	<i>Mesophilic bacteria</i>	CFU/1 mL	4–390	–	–
18	<i>E. Coli</i>	CFU/100 ml	–	8	–
19	TDS	mg/L	–	48.6	–

No	Parameter	Unit	Karakteristik Air Hujan		
			Poznań, Poland (Mazurkiewicz et al., 2022)	Hanoi, Vietnam (Lee et al.,2017)	Malaysia Timur (Serawak, Sabah) (Abdullah et al., 2022)
20	Bau		–	Tidak Berbau	–
21	Kekeruhan	NTU	–	1	–
22	As	mg/L	–	0.0001	–
23	Fe	mg/L	–	0.05	0.07
24	Cd	mg/L	–	0.0002	0
25	Ini	mg/L	–	0.001	0.02
26	Cr	mg/L	–	0.001	–
27	Mn	mg/L	–	0.001	0.08
28	Hg	mg/L	–	0.0002	0
29	Se	mg/L	–	0.001	
30	Pb	mg/L	–	0.001	0
31	Zn	mg/L	–	0.05	0.3
32	S ²⁻	mg/L	–	0.03	–
33	SO ₄ ²⁻	mg/L	–	0	5.63
34	F ⁻	mg/L	–	–	0.33
35	K	mg/L	–	–	3.41
36	Na ⁺	mg/L	–	–	18.36
37	C ₂ H ₃ O ₂	mg/L	–	–	0.35
38	CHO ₂ ⁻	mg/L	–	–	0.13
39	CH ₄ O ₃ S	mg/L	–	–	0.05
40	C ₂ O ₄ (2 ⁻)	mg/L	–	–	0.08
41	Cu	mg/L	–	–	0.03

Sumber: (Abdullah et al., 2022; Lee et al., 2017; Mazurkiewicz et al., 2022)

3.3.1.2 Decentralized/Household System

1. Jepang

Pemanfaatan air hujan sebagai upaya pengendalian banjir hingga optimalisasi kuantitas resapan air hujan telah dilakukan oleh pemerintah Jepang. Pada periode 1965-2003, Jepang mengalami penurunan ruang terbuka hijau hingga 22%, sedangkan dalam periode 2012-2021 terdapat 327 peristiwa curah hujan ≥ 50 mm/jam (hujan deras) dimana angka tersebut meningkat 40% dalam kurun waktu 10 tahun (Bhattacharya & Nakamura, 2023; Michiru, 2023). Sebesar 80% kerusakan yang terjadi akibat bencana banjir di tiga kota besar di Jepang, yaitu Osaka, Nagoya, dan 23 distrik di Tokyo) diakibatkan oleh debit air hujan yang melebihi *design capacity* dari drainase sehingga proses pelimpasan air hujan ke badan air tidak optimal (Bhattacharya & Nakamura, 2023). Dengan kondisi tersebut, terjadi penurunan angka resapan air hujan menjadi 20% dari 50%. Pada saat hujan deras, IPAL dapat menampung air limbah hingga tiga kali lipat kapasitas awal. Namun apabila melebihi kapasitas tersebut, air limbah akan dilimpahkan ke badan air yang kemudian berpotensi menimbulkan pencemaran (Michiru, 2023). Dalam menghadapi permasalahan tersebut, dilakukan upaya pemanfaatan air hujan dengan metode RWH dengan membuat tangki penampungan sementara (*retention tank*), air hujan kemudian akan dilimpahkan ke badan air pada periode tertentu untuk mengurangi beban badan air pada saat curah hujan tinggi. Selain skema RWH terpusat, metode RWH dengan skala kecil di berbagai hunian mulai menjadi opsi dalam penanggulangan banjir dan curah hujan tinggi sebagai bagian dari konsep infrastruktur hijau yang dicanangkan sejak 2015 (Michiru, 2023). Pada prinsipnya, teknologi RWH terdiri atas tiga komponen yaitu *catchment* (media penangkapan air hujan), jaringan distribusi air hujan, dan tangki penampung (Campisano et al., 2017; Judeh et al., 2022).

2. Kanada

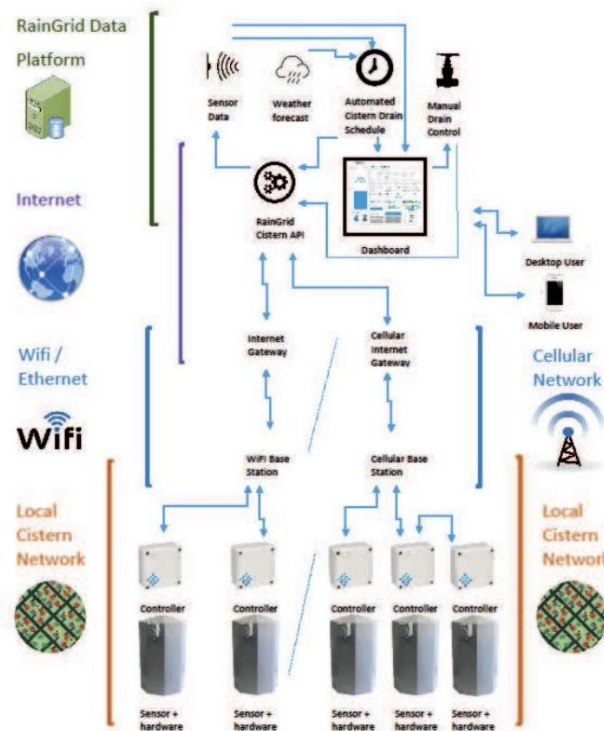
Tangki penampungan air hujan berbasis rumah (*household rainwater tanks*) menjadi salah satu metode yang umum digunakan dalam pemanfaatan air hujan. Namun terdapat hambatan dalam pemanfaatan metode ini seperti kondisi tangki air yang masih penuh saat hujan turun sehingga penampungan air hujan tidak berlangsung secara efektif (K-Water & IWRA, 2018; Liang et al., 2019). Dalam menghadapi permasalahan tersebut, dikembangkan skema pengelolaan berbasis kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*)

dan IoT yang disebut “*RainGrid Stormwater Smartgrid*” di Kanada oleh RainGrid. Dalam sistem ini, AI akan menentukan seberapa besar limpasan air hujan yang timbul berdasarkan luas permukaan atap rumah dan curah hujan sedangkan IoT akan mengedalikan sistem automasi penangkapan air hujan, filtrasi, dan penyimpanan air pada tangki dengan ukuran yang sesuai (K-Water & IWRA, 2018). Air kemudian dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan rumah tangga, berkebun hingga *groundwater recharge*.

Integrasi RWH dengan *Internet of Things* menjadi salah satu upaya untuk menciptakan sistem pengelolaan air hujan yang terintegrasi dengan konsep *smart city* sehingga implementasi sistem pengukuran pada skala yang lebih besar sebagai respon atas perkembangan teknologi sensor yang lebih terjangkau secara biaya serta teknologi *data transfer* dapat memungkinkan untuk dilakukan (Oberascher et al., 2022). Pemanfaatan AI dan IoT dalam teknologi *RainGrid Stormwater Smartgrid* menghasilkan data *real-time* terkait kondisi *micro-climate*, konsumsi air hujan oleh penghuni rumah, hingga besaran efisiensi penggunaan air bersih yang telah dilakukan oleh pemilik rumah. Terdapat empat komponen dalam sistem tersebut, yaitu (K- Water & IWRA, 2018):

- a. Tangki penampung air hujan (disertai dengan dua tahapan filtrasi primer)
- b. Algoritma cuaca berbasis *cloud* dengan *Artificial Intelligence*
- c. Sensor
- d. Saluran/jaringan distribusi pemanfaatan air hujan (baik diluar maupun didalam rumah)

Sistem AI pada teknologi ini akan memprediksi cuaca dalam lima hari kedepan. Berdasarkan data prediksi cuaca tersebut, sensor kapasitas pada tangki penyimpanan akan memantau dan menginformasikan ke *server* terkait kapasitas tersisa pada tangki tersebut yang kemudian akan dilakukan penyesuaian kapasitas tangki (misal jika curah hujan tinggi tetapi kapasitas tangki tidak mampu menampung secara optimal maka air yang ada di dalam tangki akan dikosongkan). Pemanfaatan AI dan IoT dalam teknologi ini menghasilkan seri data *micro- climate* dari suatu wilayah yang dapat berguna untuk meningkatkan akurasi perkiraan cuaca hingga mengidentifikasi dinamika perubahan iklim melalui perbandingan rangkaian peristiwa cuaca saat ini dengan masa lalu (K-Water & IWRA, 2018).



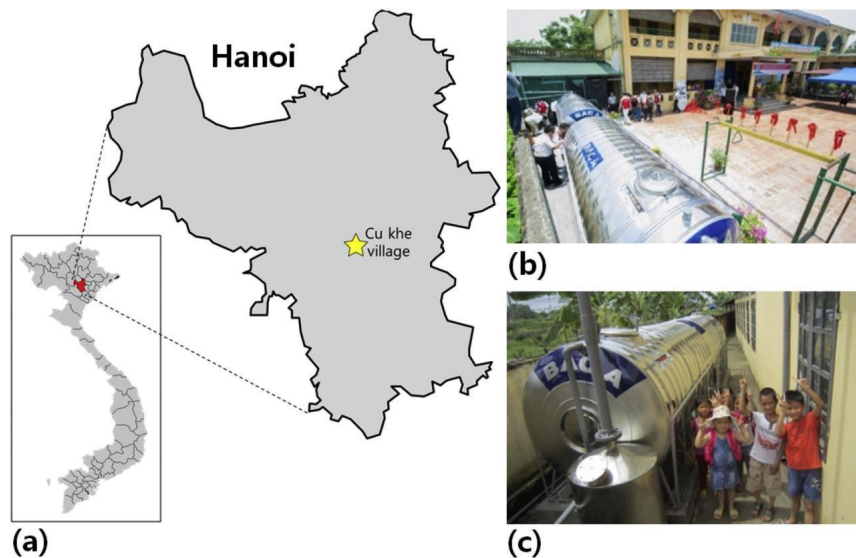
Gambar 10. Arsitektur RainGrid Stormwater Smartgrid

Sumber: (K-Water & IWRA, 2018)

3. Vietnam

Pemanfaatan air hujan dilakukan tidak hanya pada hunian atau bangunan gedung komersil, tetapi dapat dilakukan pada fasilitas pendidikan seperti sekolah. Hal tersebut menunjukkan besarnya potensi pemanfaatan air hujan untuk memenuhi kebutuhan air harian dari berbagai aktivitas. Air hujan juga menjadi salah satu sumber air yang dapat diandalkan apabila pasokan air bersih tidak memadai selain akibat kekeringan, misalnya sumber air bersih yang tercemar mengakibatkan pasokan sumber air bersih yang terhambat. Dalam penelitian yang dilakukan di Vietnam, kepentingan untuk memanfaatkan sumber air alternatif sebagai sumber air bersih dipengaruhi oleh kondisi air permukaan dan air tanah yang tercemar akibat industrialisasi dan pertumbuhan penduduk. Air permukaan tercemar oleh nitrogen dan fosfor, sedangkan air tanah tercemar oleh kandungan arsen, mangan, dan besi (Lee et al., 2017). Air tanah tidak dapat digunakan untuk kebutuhan konsumsi (*potable use*) meskipun sudah diolah menggunakan *sand filtration* akibat kandungan arsen yang tinggi. Distribusi air minum di Vietnam hanya menjangkau 60% kawasan perumahan di perkotaan dan hanya menjangkau 10% rumah di pedesaan. Vietnam memiliki angka curah hujan yang cukup tinggi pada rentang Mei-September yaitu sebesar 1.680 mm/tahun,

sehingga pemanfaatan air hujan menjadi suatu alternatif yang strategis untuk memenuhi kebutuhan air masyarakat (Lee et al., 2017).



Gambar 11. (a) Lokasi Fasilitas Pendidikan yang Menerapkan Teknologi *Rainwater Harvesting*; (b, c) Unit *Rainwater Harvesting* yang Telah Terpasang

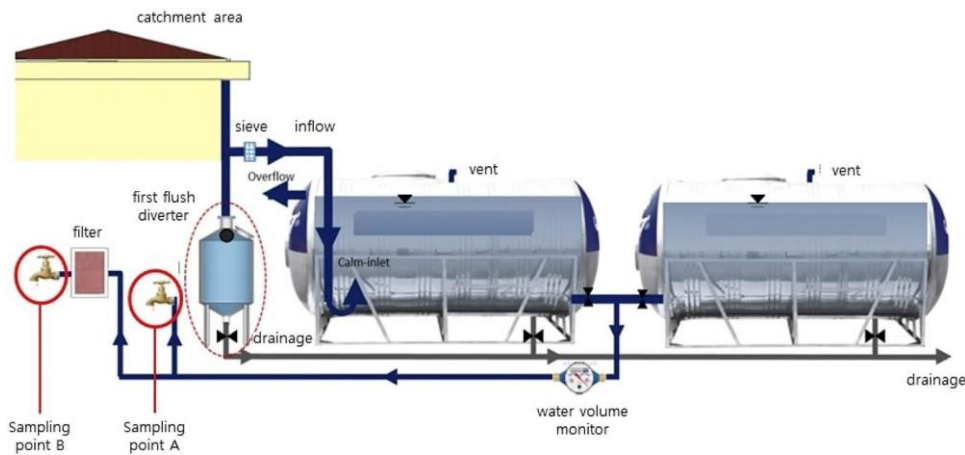
Sumber: (Lee et al., 2017)

Penelitian penerapan teknologi *rainwater harvesting* dilakukan di dua fasilitas Pendidikan di Hanoi, Vietnam yang berdekatan dengan kawasan delta Sungai Merah yang tercemar oleh limbah saluran pembuangan (*sewer effluent*) dari kota Hanoi dan air tanahnya memiliki kandungan arsen yang tinggi. Sistem *rainwater harvesting* yang digunakan terbagi menjadi empat unit yaitu (Lee et al., 2017):

Penelitian penerapan teknologi *rainwater harvesting* dilakukan di dua fasilitas Pendidikan di Hanoi, Vietnam yang berdekatan dengan kawasan delta Sungai Merah yang tercemar oleh limbah saluran pembuangan (*sewer effluent*) dari kota Hanoi dan air tanahnya memiliki kandungan arsen yang tinggi. Sistem *rainwater harvesting* yang digunakan terbagi menjadi empat unit yaitu (Lee et al., 2017):

1. *Catchment*: atap berbahan *galvanized iron*
2. *Flush Diverter*
3. Pipa: pipa *inlet* yang tersambung dengan tangki penyimpanan air, berbahan *stainless steel*. Pipa distribusi berbahan PVC
4. *Water Storage Tank*: terdapat dua unit dengan kapasitas masing-masing sebesar 5-6 m³
5. Filtrasi dan Sterilisasi:

- a. Filtrasi: *mosquito net*, *physical filter* (*cartridge filter*, filter sedimen, *pre-carbon filter*, *membrane filter*, *post carbon filter*, dan *total contaminant removal filter*)
- b. Sterilisasi: *UV sterilizer*, diletakkan setelah unit *physical filter*



Gambar 12. Detail Unit *Rainwater Harvesting* pada Dua Fasilitas Pendidikan di Hanoi, Vietnam

Sumber: (Lee et al., 2017)

Target kualitas air olahan dari sistem *rainwater harvesting* tersebut adalah air minum, sehingga digunakan teknologi yang dapat mencapai target baku mutu kualitas air minum namun tetap mempertimbangkan kemudahan perawatan. Dilakukan pengukuran terhadap dua kategori parameter sesuai dengan regulasi standar air minum di Vietnam, yaitu parameter fisik dan konstituen anorganik serta parameter mikroorganisme (Lee et al., 2017). Terdapat 20 parameter pemantauan dalam kategori parameter fisik dan konstituen anorganik, yaitu pH, bau, kekeruhan, nitrat, nitrit, kesadahan, sulfat, besi, mangan, seng, TDS, ammonia, arsen, H₂SO₄, timbal, merkuri, cadmium, kromium, nikel, dan selenium. Sedangkan pada kategori parameter mikroorganisme terdapat dua parameter yang diukur yaitu coliform dan *E.coli*.

Secara kualitas, air hasil olahan telah memenuhi baku mutu air minum Vietnam, namun terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan yaitu nilai pH (air hujan adalah 7,6 dan air olahan adalah 6,7) yang cukup rendah berpotensi menimbulkan korosi pada unit pengolahan yang kemudian dapat menimbulkan bau serta rasa pada air olahan (Lee et al., 2017). Adanya kandungan coliform dan *E.coli* pada air hujan sebelum diolah menunjukkan pentingnya peran unit sterilisasi untuk mencegah dampak negatif bagi kesehatan. Kandungan *E.coli* yang tinggi ditemukan pada bulan Maret dikarenakan adanya akumulasi mikroorganisme dari kotoran burung dan dekomposisi material organik (daun) di atap dan talang air saat musim kemarau yang berlangsung sejak November-Maret, terbawa masuk

ke unit pengolahan ketika hujan turun di musim hujan (Lee et al., 2017). Beberapa sampel air tidak mengandung *E.coli* namun terdapat nilai *total coliform* menunjukkan adanya lapisan biofilm dalam *water storage tank*. Keberadaan lapisan biofilm memiliki manfaat untuk mengadsorpsi kontaminan pada air hujan (Lee et al., 2017). Lapisan biofilm bisa dihilangkan dengan meningkatkan nilai *surface to volume ratio* dari tangki air tersebut pada tahap desain dan bisa pula menggunakan UV *sterilizer* serta filter membrane untuk menghilangkan residu mikroorganisme pada air olahan (Lee et al., 2017).

Tabel 9. Perbandingan Baku Mutu Air Hujan dan Air Olahan

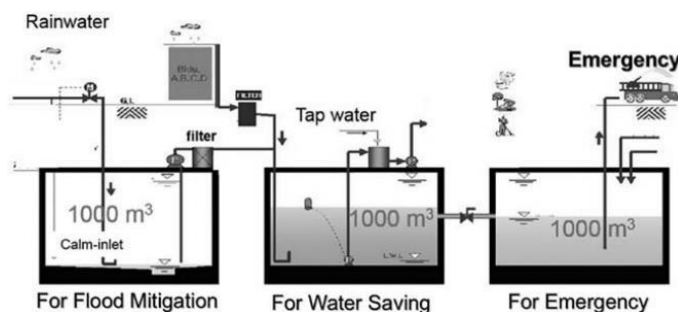
Parameter	Baku Mutu		Air Hujan	Air Olahan
	Vietnam	WHO	Nilai	Nilai
pH	6.5–8.5	8.2–8.8	7.6	6.7
TDS (mg/L)	1000	–	48.6	32
Bau	Tidak Berbau	Tidak Berbau	Tidak Berbau	Tidak Berbau
Kekeruhan	2 NTU	1.5 NTU	1	0.3
NO ₂ -N (mg/L)	3	3	0.23	0.11
NO ₃ -N (mg/L)	50	50	0.96	2
NH ₃ -N (mg/L)	3	–	0.33	0.21
Kesadahan (mg/L CaCO ₃)	300	–	20	16
As (mg/L)	0.01	0.01	0.0001	0.002
Fe (mg/L)	0.3	0.1	0.05	0.03
Cd (mg/L)	0.003	0.003	0.0002	0.0002
Ni (mg/L)	0.02	0.07	0.001	0.002
Cr (mg/L)	0.05	0.05	0.001	0.001
Mn (mg/L)	0.3	0.05	0.001	0.002
Hg (mg/L)	0.001	0.006	0.0002	0.0001
Se (mg/L)	0.01	0.01	0.001	0.002
Pb (mg/L)	0.01	0.01	0.001	0.001
Zn (mg/L)	3	–	0.05	0.04
S ²⁻ (mg/L)	0.05	–	0.03	0.033
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	250	–	0	0.5
Coliform (CFU/100 ml)	0	0	270	0
<i>E. Coli</i> (CFU/100 ml)	0	0	8	0

Sumber: (Lee et al., 2017)

3.3.1.3 City Scale System

1. Korea Selatan

Selain untuk mitigasi banjir dan penggunaan secara umum, skema pengelolaan air hujan dapat dikembangkan untuk penyediaan cadangan air kebutuhan darurat (*emergency water supply*) yang telah dilakukan oleh Star City di Korea Selatan. Star City merupakan kawasan komersil di timur laut Seoul yang memiliki empat bangunan gedung setinggi 35-57 lantai dengan >1300 unit apartemen. Dengan luasan *catchment area* sebesar 6200 m² (empat *rooftop* bangunan gedung) dan 45.000 m² taman serta teras, implementasi *Rainwater Management System* (RWMS) telah dilakukan sejak 2007 dan menjadi acuan terkait system manajemen air yang melengkapi sistem terpusat sebagai strategi adaptasi perubahan iklim (Han, 2020). Terdapat tangki penyimpanan air hujan dengan kapasitas 3000 m³ yang terbagi menjadi 3 x 1000 m³ tangki penyimpanan masing-masing berfungsi sebagai pengendalian dan mitigasi banjir (tangki akan dikosongkan satu hari sebelum hujan deras/badai), penyimpanan air untuk penggunaan secara umum (e.g., menyiram taman, *toilet flushing*, pembersihan jalan dan fasilitas umum) dan cadangan air darurat (e.g., pemadam kebakaran/*water hydrant*, pasokan air cadangan apabila pasokan air utama terputus). Skema RWMS tersebut memiliki nilai *Rainwater Utilization Ratio* (RUR) sebesar 47% atau setara dengan penghematan 26.000 m³/tahun.



Gambar 13. Skema Desain Tangki Penyimpanan Air Hujan Star City, Korea Selatan

Sumber: (Han, 2020)

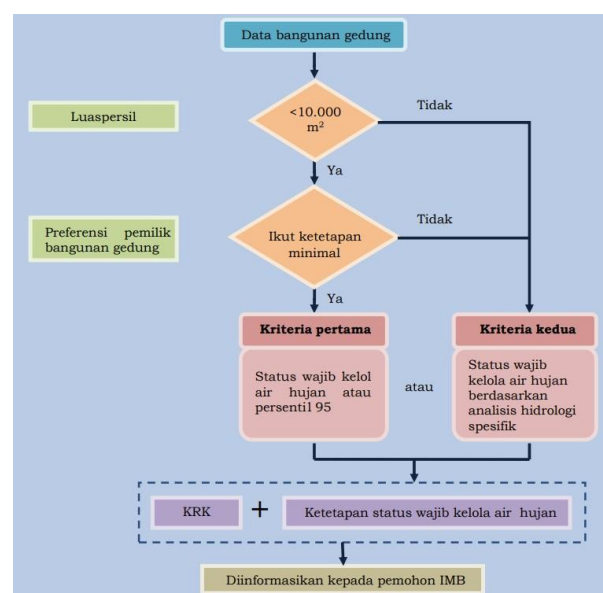
Sistem penyimpanan air hujan dilengkapi dengan *coarse screen* untuk menyisihkan pengotor dan pipa berbentuk “J” untuk mencegah sedimen kembali tersuspensi (Han, 2020). Dalam hal kualitas air dalam tangki penyimpanan, nilai pH adalah sebesar 6,2-8,5 dan nilai kekeruhan <1,5 NTU (kekeruhan dapat direduksi karena desain tangki beraliran *plug flow* dan *detention time* yang cukup lama) sehingga aman untuk irigasi hingga *toilet flushing*, namun dapat pula dimanfaatkan untuk air minum darurat dengan menggunakan sistem pengolahan air sederhana (Han, 2020). Penggunaan skema RWMS tersebut juga

memberikan manfaat bagi kota-kota di sekitar Star City yaitu tidak lagi mengalami banjir selama 15 tahun terakhir sejak implementasi skema tersebut (Han, 2020).

3.2.2 Regulasi dan Standar Teknis

Pemanfaatan air hujan telah diatur dalam beberapa peraturan terkait. Pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup nomor 12 tahun 2009 tentang Pemanfaatan Air Hujan dijelaskan bahwa pemanfaatan air hujan dilakukan untuk mengurangi genangan air atau banjir serta mempertahankan kualitas dan meningkatkan kuantitas air tanah. Peraturan tersebut memberikan Pedoman kepada penanggungjawab bangunan dan pemerintah kabupaten/kota dalam memanfaatkan air hujan. Cara pemanfaatan air hujan dilakukan dengan membuat kolam pengumpul air hujan, sumur resapan, dan/atau lubang biopori. Peraturan tersebut menitik beratkan pemanfaatan air hujan untuk *groundwater recharge* sehingga dapat mengatasi permasalahan pemanfaatan air tanah berlebih dengan mempertahankan kesetimbangan air tanah.

Peraturan Menteri PUPR nomor 11/PRT/M/2014 tentang Pengelolaan Air Hujan pada Bangunan Gedung dan Persilnya mengatur terkait Upaya dan kegiatan untuk mempertahankan kondisi hidrologi alami, dengan cara memaksimalkan pemanfaatan air hujan, infiltrasi air hujan, dan menyimpan sementara air hujan untuk menurunkan debit banjir melalui optimasi pemanfaatan elemen alam dan pemanfaatan elemen buatan. Air hujan yang jatuh pada persil bangunan gedung wajib dikelola dan harus diupayakan untuk tidak melimpas keluar dari persil bangunan gedung sehingga tidak memberikan dampak kerugian lingkungan ketika hujan.

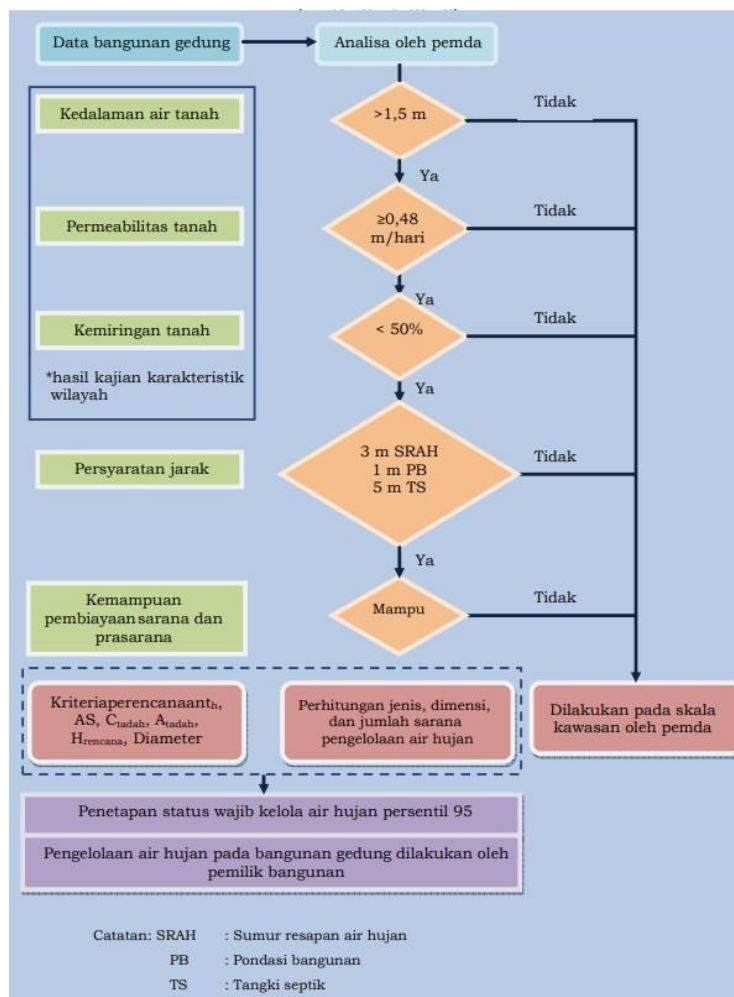


Gambar 14. Bagan Alir Pemilihan Status Wajib Kelola Air Hujan (Tahap 1)

Sumber: Peraturan Menteri PUPR nomor 11 tahun 2014

Bangunan gedung yang wajib melakukan pengelolaan air hujan ditentukan berdasarkan dua kriteria, yaitu:

1. Kriteria Pertama (Pengelolaan Air Hujan Persentil 95)
 - a. Faktor Teknis
 - i. Kedalaman muka air tanah
 - ii. Permeabilitas tanah
 - iii. Kemiringan tanah
 - iv. Pemenuhan persyaratan jarak sarana pengelolaan air hujan terhadap pondasi bangunan, tangki septik, dan sumur resapan
 - b. Faktor non teknis, yaitu tingkat kemampuan pembiayaan pemilik/pengguna gedung dalam penyediaan sarana dan prasarana. Jika tidak mampu, maka pemerintah kabupaten/kota dan provinsi (khusus untuk DKI Jakarta) wajib melaksanakan pengelolaan air hujan skala kawasan mengacu pada peraturan yang berlaku

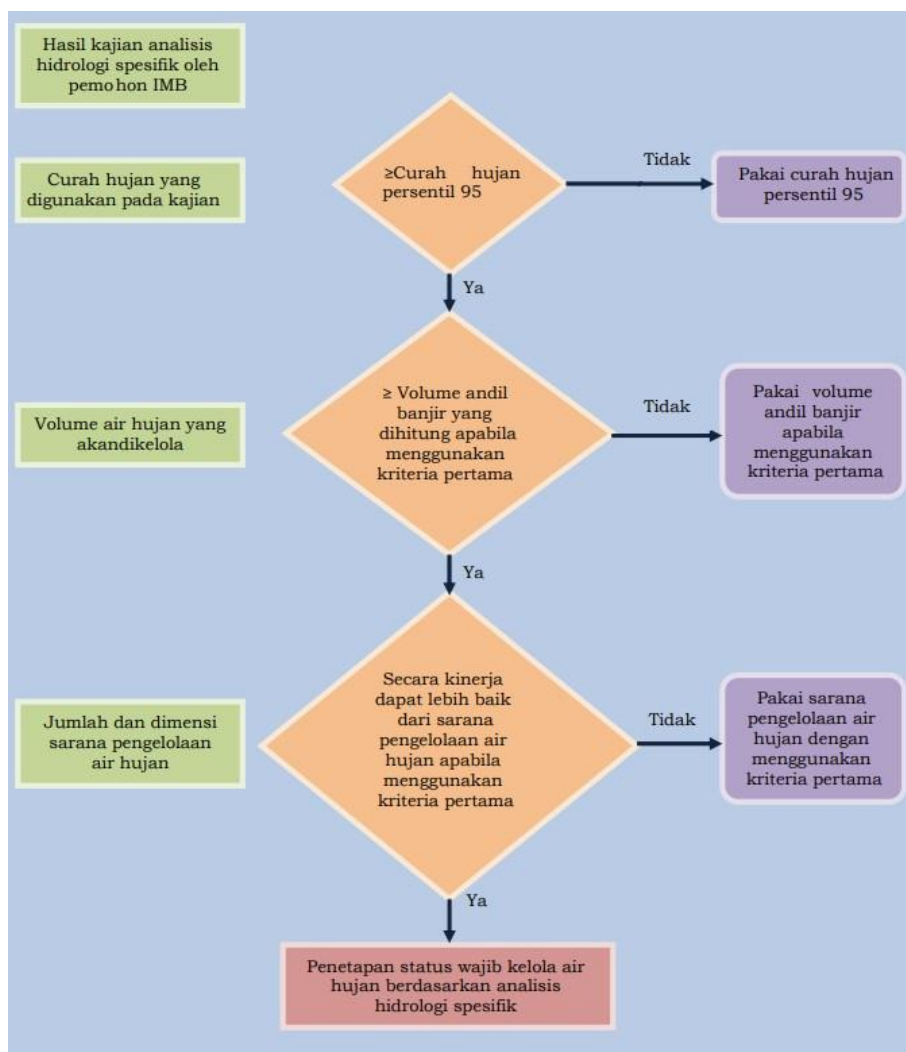


Gambar 15. Bagan Alir Penetapan Status Wajib Kelola Air Hujan Kriteria Pertama

Sumber: Peraturan Menteri PUPR nomor 11 tahun 2014

Bangunan gedung yang wajib melakukan pengelolaan air hujan ditentukan berdasarkan dua kriteria, yaitu:

1. Kriteria Kedua (Pengelolaan Air Hujan Berdasarkan Analisis Hidrologi Spesifik pada Persil Bangunan Gedung)
 - a. Dilakukan dengan mengevaluasi Pedoman hidrologi spesifik yang dilaksanakan pemohon IMB dengan membandingkan besaran curah hujan, volume air hujan yang dikelola, dan jumlah serta dimensi sarana pengelolaan air hujan berdasarkan hasil pedoman hidrologi spesifik dengan komponen yang dihasilkan dengan perhitungan status wajib Kelola air hujan persentil 95. Ketentuan status wajib Kelola air hujan dilakukan dengan memilih komponen terbesar dari kedua komponen yang dibandingkan



Gambar 16. Bagan Alir Penetapan Status Wajib Kelola Air Hujan Kriteria Kedua

Sumber: Peraturan Menteri PUPR nomor 11 tahun 2014

Dalam peraturan tersebut pula dijelaskan terkait prioritas pemanfaatan air hujan yang terbagi atas tiga tingkat prioritas, yaitu:

1. Prioritas 1: air hujan dimanfaatkan sebagai air minum (diolah sesuai dengan standar baku mutu). Pemanfaatan ini dilaksanakan pada daerah sulit air
2. Prioritas 2: memaksimalkan infiltrasi air hujan selama tidak ada larangan dari pemerintah daerah setempat. Hal ini dilakukan pada daerah yang memungkinkan untuk infiltrasi
3. Prioritas 3: air hujan ditahan untuk sementara waktu agar tidak langsung dilimpaskan ke badan air. Hal ini merupakan opsi terakhir jika Prioritas 1 dan 2 tidak memungkinkan untuk dilaksanakan, dapat dilakukan pula pada daerah yang tidak memungkinkan untuk terjadinya infiltrasi.

3.3.3 Parameter dan Sensor

3.3.3.1 Parameter

Parameter pengawasan kualitas air dalam *rainwater management* berkaitan erat dengan target penggunaan air olahan. Dalam berbagai literatur, air hujan yang ditampung digunakan untuk kebutuhan kebersihan lingkungan, *groundwater recharge*, menyiram tanaman, pengendalian limpasan air, kebutuhan domestik (*potable and non-potable water*) hingga cadangan air darurat (Han, 2020; Judeh et al., 2022; K-Water & IWRA, 2018; Michiru, 2023). Kualitas air hujan juga perlu diketahui untuk dapat menentukan sistem pengolahan yang tepat sesuai dengan kualitas air hujan yang akan diolah dan target kualitas air hasil olahan (menyesuaikan dengan kebutuhan penggunaan). Kondisi lingkungan dan kawasan sekitar (e.g., aktivitas industri, pertanian, dan masyarakat sekitar) serta material yang digunakan pada unit RWH (material atap, pipa, tangki penampung) mempengaruhi kualitas air hujan (Campisano et al., 2017; Judeh et al., 2022). Permasalahan umum dari air hujan adalah adanya potensi pH air bernilai rendah sehingga menimbulkan suasana asam pada air tersebut (umum diketahui sebagai fenomena “hujan asam”) yang dapat dipengaruhi dari tingginya emisi gas buang kendaraan bermotor hingga aktivitas industri (Campisano et al., 2017). Menurut *World Health Organization* (WHO), terdapat empat parameter kualitas air hujan yang harus diperhatikan yaitu parameter fisik (e.g., kekeruhan), parameter kimiawi (e.g., nitrat, timbal, seng, logam, hingga nutrien), serta kontaminan biologis (e.g., *coliform*) (Judeh et al., 2022).

Pada studi yang dilakukan di kota Jenin, Tepi Barat Palestina, digunakan parameter pH, kekeruhan, klorida, alkalinitas, TDS, *fecal coliform*, dan residu klorin (Judeh et al., 2022). Pada penelitian lain yang dilakukan di Star City, Korea, hanya parameter pH dan kekeruhan yang dilakukan pengukuran karena pengaliran air hujan yang singkat dari *catchment* ke sistem RWH (Han, 2020). Parameter yang lebih kompleks digunakan untuk menilai kualitas air hujan dikarenakan peruntukan penggunaannya sebagai sumber air baku untuk minum seperti dalam penelitian yang dilakukan terhadap kualitas air hujan di Vietnam dimana terdapat 22 parameter yang dilakukan penilaian yaitu pH, TDS, bau, kekeruhan, NO₂-N, NO₃-N, NH₃-N, kesadahan, arsen (As), besi (Fe), kadmium (Cd), nikel (Ni), krom (Cr), mangan (Mn), raksa (Hg), selenium (Se), timbal (Pb), seng (Zn), sulfida (S²⁻), sulfat (SO₄²⁻), koliform, dan *E.coli* (Lee et al., 2017).

Parameter tersebut merupakan bagian dari 109 parameter baku mutu kualitas air minum dalam peraturan pemerintah Vietnam, pemilihan parameter penilaian tersebut didasarkan pada kondisi bahwa kawasan penelitian tersebut merupakan kawasan yang bebas dari pestisida, senyawa radioaktif, klorin, dan senyawa kimia organik lainnya. Keberadaan senyawa kimiawi dalam air hujan jarang ditemukan dan tidak memiliki dampak signifikan terhadap manusia (Lee et al., 2017). Parameter yang kompleks juga digunakan dalam penilaian kualitas air hujan di kawasan Malaysia Timur, sebanyak 23 parameter dilakukan penilaian yaitu amonia (NH₄⁺), kalsium (Ca²⁺), florida (F⁻), magnesium (Mg⁺), kalium (K), natrium (Na⁺), nitrat (NO₃⁻), sulfat (SO₄²⁻), asetat (C₂H₃O₂), klorida (Cl⁻), format (CHO₂⁻), asam metanasulfonat (CH₄O₃S), oksalat (C₂O₄²⁻), tembaga (Cu), besi (Fe), mangan (Mn), merkuri (Hg), nikel (Ni), kadmium (Cd), konduktivitas (EC), timbal (Pb), pH, dan seng (Zn) (Abdullah et al., 2022). Pemilihan parameter tersebut disesuaikan dengan aktivitas pada lokasi pengambilan sampel air hujan (Bintulu, Kota Kinabalu, Kuching, Labuan, Danum Valley, dan Tawau) dan kondisi kawasan tersebut. Misal, penilaian parameter Zn dilakukan salah satunya adalah untuk mengetahui dampak material atap rumah warga terhadap kualitas air hujan, penilaian parameter amonia dilakukan untuk mengidentifikasi dampak aktivitas pertanian terhadap kualitas air hujan (Abdullah et al., 2022).

Tabel 10. Penggunaan Berbagai Parameter Pemantauan Kualitas Air Hujan

Parameter	WHO Guidelines Drinking- Water Quality 4thEd., 1st Addendum	Vietnam (Lee et al., 2017)	Jenin, Tepi Barat Palestina (Judeh et al., 2022)	Star City, Korea (Han, 2020)	Malaysia Timur (Abdullah et al., 2022)	Bandung (Hasan et al., 2019)
pH	√	√	√	√	√	√
TDS (mg/L)	√	√				
Bau		√				
Kekeruhan		√	√	√		
Konduktivitas					√	
NO ₂ -N (mg/L)		√				
NO ₃ -N (mg/L)		√				√
NO ⁻³ (mg/L)					√	
NH ₃ -N (mg/L)		√				
NH ₄ ⁺ (mg/L)					√	
Hardness(mg/L CaCO ₃)		√	√ (Kesadahan)			
K (mg/L)					√	
Na ⁺ (mg/L)					√	
F ⁻ (mg/L)					√	
Mg ⁺ (mg/L)					√	
As (mg/L)		√				√
Fe (mg/L)		√			√	
Cd (mg/L)		√			√	√
Ni (mg/L)		√			√	
Cr (mg/L)		√				√
Mn (mg/L)		√			√	
Hg (mg/L)		√			√	
Se (mg/L)		√				
Pb (mg/L)		√			√	√
Zn (mg/L)		√			√	√
S ²⁻ (mg/L)		√				
CHO ₂ ⁻ (mg/L)					√	
CH ₄ O ₃ S (mg/L)					√	

Parameter	WHO Guidelines Drinking- Water Quality 4thEd., 1st Addendum	Vietnam (Lee et al., 2017)	Jenin, Tepi Barat Palestina (Judeh et al., 2022)	Star City, Korea (Han, 2020)	Malaysia Timur (Abdullah et al., 2022)	Bandung (Hasan et al., 2019)
C2O4(2 ⁻) (mg/L)					√	
C2h3O2 (mg/L)					√	
Cu (mg/L)					√	
Cl ⁻ (mg/L)					√	√
Ca ²⁺ (mg/L)					√	
SO ₄ ²⁻ (mg/L)		√			√	√
Klorida (mg/L)			√			
Coliform (CFU/100 ml)		√				
E. Coli (CFU/ 100 ml)		√				
Alga, racun alga dan metabolit	√					
Residu Disinfeksi	√					
Disinfection Byproducts (DBPs)	√					
Bakteri Heterotrofik	√					
Tekanan Hidrolis	√					

Sumber: (Abdullah et al., 2022; Han, 2020; Hasan et al., 2019; Judeh et al., 2022; Lee et al., 2017)

Parameter yang lebih sederhana digunakan dalam penilaian kualitas air hujan di kota Bandung pada tiga lokasi yaitu Coblong, Sumur Bandung, dan Buah Batu (Hasan et al., 2019). Adapun parameter yang digunakan adalah pH, sulfat (SO₄²⁻), nitrat (NO₃⁻), klorida (Cl⁻), arsen (As), cadmium (Cd), krom (Cr), timbal (Pb), dan seng (Zn). Kandungan Pb dan Zn diteliti untuk mengetahui dampak emisi kendaraan serta aktivitas industri, nilai pH perlu diketahui untuk mengidentifikasi suasana air dan keberadaan senyawa lain yang mempengaruhi nilai pH (e.g., NO_x, SO_x), parameter tersebut juga dipilih dengan mempertimbangkan kondisi karakteristik kawasan seperti aktivitas masyarakat di kawasan tersebut yang menjadi sumber pencemar antropogenik (e.g., padat akan kendaraan bermotor, industri, dan lainnya) (Hasan et al., 2019).

Pada dasarnya, pemilihan parameter penilaian harus disesuaikan dengan karakteristik air hujan dan kawasan, target penggunaan air hujan, hingga ketersediaan alat/sensor. Terdapat hubungan kausalitas antar parameter yang kemudian dapat digunakan sebagai indikator keberadaan polutan lainnya. Sebagai contoh, nilai dari parameter konduktivitas dapat digunakan untuk mengidentifikasi konsentrasi TDS, kandungan logam berat (dengan menggunakan afinitas elektron, dikombinasikan bersama parameter suhu dan pH). Parameter tersebut kemudian disebut sebagai parameter pengganti (*surrogate parameters*). Sehingga, dengan mengidentifikasi parameter pengganti (*surrogate parameters*) dapat dilakukan penyederhanaan pengukuran karena cukup mengukur parameter pengganti saja dan nilai parameter pengganti tersebut dapat diolah untuk mengetahui nilai-nilai parameter lainnya. Terdapat enam parameter pengganti yang dapat digunakan, yaitu (Suits et al., 2023):

Tabel 11. Parameter Pengganti dan Hubungannya dengan Parameter Lainnya

Parameter Pengganti	Hubungan
<i>Electrical conductivity</i> (korelasi)	<i>Total dissolved solids</i> (TDS), logam berat (terlarut), nutrien (total nitrogen).
Kekeruhan (korelasi)	<i>Total suspended solids</i> (TSS), logam berat (<i>particle-bound</i>), nutrien (<i>total phosphorus</i>), patogen.
Temperatur air	Mempengaruhi kelarutan logam berat dan fotosintesis dari tumbuhan air (<i>general toxicity</i> , kandungan oksigen). Dapat mengindikasikan <i>fresh pollution</i> (e.g., limbah cair buangan rumah tangga secara ilegal dan limbah cair industri)
pH	Dapat digunakan untuk mendeteksi pencemaran. Kenaikan atau penurunan yang tajam dapat mengindikasikan adanya polutan yang masuk. Nilai pH juga berkaitan dengan kelarutan logam
<i>Dissolved oxygen</i>	Penurunan DO yang tajam dapat mengindikasikan adanya polutan yang masuk (e.g., tumpahan minyak). Nilai DO yang rendah mengindikasikan adanya konsumsi oksigen dalam air baik sebuah list parameter yang paling umum dipakai based on literatur cara proses kimiawi maupun biologis (e.g., dekomposisi senyawa organik, pernapasan/respirasi)

Sumber: (Suits et al., 2023)

Dalam dokumen Laporan Akhir Penyusunan Rencana Induk Terintegrasi Infrastruktur Dasar Permukiman (RIT) tahun anggaran 2021 milik Direktorat Jenderal Cipta Karya Kementerian PUPR, penggunaan sumber air alternatif diluar air tanah dan PDAM untuk kebutuhan sehari-hari di KIPP menjadi salah satu poin capaian pada aspek sumber air. Dijelaskan dalam dokumen tersebut bahwa, dengan merujuk kepada PP nomor 122 tahun

2015, terdapat empat sumber air yang teridentifikasi dapat digunakan untuk kebutuhan sehari-hari termasuk sanitasi, yaitu air tanah, air hujan, air permukaan, dan air laut. Adapun kondisi secara umum air hujan adalah turbiditas rendah, kandungan organik rendah, kandungan mineral sangat rendah, dan suhu air yang rendah.

Untuk mewujudkan konsep *sponge city*, dalam dokumen tersebut dijelaskan pula panduan dan spesifikasi aktivitas preservasi daur air dimana Pemanenan Air Hujan (*Rainwater Harvesting/RWH*) menjadi salah satu aktivitas preservasi dalam daur air. Panduan tersebut menjelaskan pemanfaatan air hujan harus dimaksimalkan dengan menangkap langsung dari sumbernya untuk memenuhi kebutuhan air, dibandingkan dengan membiarkan semua air hujan mengalir ke badan air maupun menyerap ke tanah. Nilai pH air hujan yang bisa dipanen di tingkat persil untuk penggunaan air adalah sebesar 5,6. Dalam konteks pengelolaan air minum kawasan, air hujan hasil *rainwater harvesting* dapat dicampur dengan air daur ulang (bersumber dari hasil olahan IPAL) untuk kebutuhan *non-potable water*. Peruntukan penggunaan *non-potable water* adalah untuk *parcel gardening/landscape, cleaning/kebersihan bangunan dan lanskap, serta cooling tower* (dengan dilakukan *pre-treatment*). Adapun baku mutu yang digunakan adalah baku mutu air hygiene dan sanitasi (Permenkes nomor 2 tahun 2023).

Tabel 12. Baku Mutu Air Higiene dan Sanitasi

No	Parameter	Baku Mutu Air Higiene dan Sanitasi (Permenkes 2 tahun 2023)	
		Nilai	Satuan
1	Temperatur	Suhu udara ± 3	$^{\circ}\text{C}$
2	Padatan terlarut total (TDS)	<300	mg/L
3	Kekeruhan	<3	NTU
4	Warna	10	TCU
5	Bau	Tidak berbau	-
6	Derajat keasaman (pH)	6.5 - 8.5	-
7	Nitrat (sebagai NO_3) (terlarut)	20	mg/ L
8	Nitrit (sebagai NO_2) (terlarut)	3	mg/L
9	Besi (Fe) terlarut	0.2	mg/ L
10	Mangan (Mn) terlarut	0.1	mg/L
11	Kromium heksavalen (Cr-(VI))	0.01	mg/ L
12	Total Coliform	0	CFU / 100 ml
13	Escherichia coli	0	CFU / 100 ml

Sumber: Permenkes nomor 2 tahun 2023

Berdasarkan pertimbangan terhadap baku mutu dari target penggunaan air dan literatur terkait, parameter yang dilakukan penilaian dalam sistem RWH pada KIPP adalah parameter cuaca, parameter *water level*, dan parameter kualitas air (konduktivitas (berkaitan dengan TDS), kekeruhan, suhu air, pH, DO, coliform).

3.3.3.2 Sensor

Komponen sensor memegang peranan penting dalam sistem *smart* RWH. Setidaknya terdapat tiga komponen sensor yaitu sensor cuaca, sensor pengendali tangki, dan sensor kualitas air. Sensor berkomunikasi untuk mengirimkan data dan status terkini dari masing-masing perangkat RWH untuk kemudian dilakukan pengambilan keputusan baik secara manual maupun otomatis. Integrasi sensor dan perangkat lunak termasuk dalam implementasi *Internet of Things* (IoT) yang kemudian mempermudah operasional, mereduksi *human error*, meningkatkan akurasi pengambilan keputusan, hingga menekan biaya-biaya operasional lainnya.

1. Sensor Cuaca

Sensor cuaca bertujuan untuk melakukan prediksi hujan dalam beberapa hari kedepan, dalam implementasi sistem *smart* RWH di Kanada menggunakan “RainGrid Stormwater Smartgrid” terdapat unit yang dapat melakukan perkiraan cuaca dalam lima hari kedepan menggunakan algoritma berdasarkan data historis (data cuaca dari *Environment Canada* atau NOAA) dan dengan kondisi iklim kawasan (e.g., persipitasi, tekanan udara, kelembaban, dan lainnya) (K-Water & IWRA, 2018). Hasil perkiraan cuaca tersebut kemudian diterjemahkan menjadi keputusan untuk mengosongkan tangki apabila tangki penampung dalam kondisi penuh dan tidak dapat menampung air hujan saat terjadinya hujan. Detail terkait rekomendasi sensor cuaca dapat dilihat pada bagian lampiran dari dokumen ini.

2. Sensor Pengendali Tangki

Dalam hal ini, sensor pengendali tangki berfungsi untuk mengetahui kondisi volume air dalam tangki. Sensor *water level* berperan untuk mengirimkan informasi terkait kondisi *water level* dalam tangki, sehingga dapat dilakukan pengosongan tangki sebelum hujan turun (apabila tangki penuh). Dalam proses perencanaan sistem RWH di KIPP, diperlukan analisis potensi air hujan yang dapat dipanen dengan mengacu pada parameter hujan yang jatuh (satuan mm) dan luas rencana atap di kawasan KIPP. Besaran tangki penampungan

air hujan berhubungan dengan besar debit air hujan yang akan ditampung, yang mana ditentukan berdasarkan nilai curah hujan dan luas rencana atap. Detail terkait rekomendasi sensor pengendali tangki dapat dilihat pada bagian lampiran dari dokumen ini.

3. Sensor Kualitas Air

Sensor kualitas terpasang pada bagian inlet dan tangki penampungan untuk mengetahui kualitas air hujan yang masuk dan hasil olahan. Kualitas air hasil olahan harus bersesuaian dengan baku mutu peruntukan penggunaan air, yaitu baku mutu air minum sesuai Permenkes nomor 2 tahun 2023. Detail terkait rekomendasi sensor kualitas air dapat dilihat pada bagian lampiran dari dokumen ini.

3.4 *Greywater Recycling dan Wastewater Reuse (GR)*

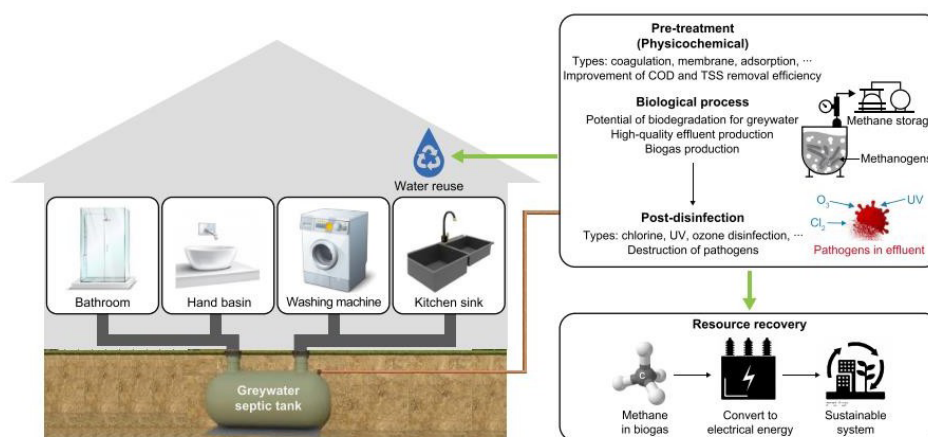
Pada sub – bab ini akan dibahas terkait pedoman literatur GR di berbagai negara, jenis parameter dan sensor yang biasa digunakan dalam GR, dan regulasi terkait GR.

3.4.1 *State-of-the-art*

Pemanfaatan sumber air selain air tanah menjadi opsi yang dipertimbangkan dalam memenuhi kebutuhan air perkotaan. Sebanyak 55% populasi dunia tinggal di perkotaan dan sekitar 68% dari total populasi manusia akan tinggal di kawasan padat penduduk pada tahun 2050 (Lakho et al., 2021). Hal tersebut kemudian mendorong perubahan tata guna lahan kawasan kota dan pinggir kota yang menyebabkan peningkatan suhu kawasan, berkurangnya lahan terbuka hijau, hingga peningkatan kebutuhan energi dan air serta peningkatan jumlah timbulan air limbah. Kondisi tersebut kemudian berkorelasi erat dengan peningkatan angka sumber air yang tercemar di berbagai wilayah sehingga mengakibatkan terbatasnya pemenuhan kebutuhan air bersih khususnya di wilayah padat penduduk (Oh et al., 2018). Dengan kondisi keterbatasan sumber air bersih tersebut, diprediksi pada 2024 sebanyak 2,7 miliar orang di seluruh dunia (sekitar 50% total populasi dunia) mengalami krisis pasokan air bersih (Juan et al., 2016). Berbagai upaya optimasi pemanfaatan air melalui skema *water recycling*, dalam hal ini *greywater recycling*, menjadi salah satu solusi dalam memenuhi kebutuhan air bersih perkotaan. Pemenuhan kebutuhan air bersih melalui *greywater recycling* bertujuan untuk memenuhi kebutuhan *non-potable water* (air untuk kebutuhan non-konsumsi) sehingga dapat menjaga sumber air bersih agar dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan *potable water* (air untuk kebutuhan konsumsi) (Lakho et al., 2021).

Greywater dapat didefinisikan sebagai air limbah domestik yang berasal dari hasil aktivitas mencuci pakaian, mandi, hingga mencuci/kebersihan dapur (Lakho et al., 2021; Oh et al., 2018) yang bisa dimanfaatkan lebih lanjut setelah melalui pengolahan. Berlimpahnya timbulan *greywater* di perkotaan (60-200 L timbulan *greywater* per kapita di negara berkembang) dan rendahnya konsentrasi polutan organik serta patogen (termasuk *fecal contamination*) sehingga pengolahan yang harus dilakukan relatif lebih mudah menjadikannya sebagai salah satu sumber air perkotaan yang strategis dan menjanjikan karena berpotensi menghemat 50-80% konsumsi air (Lakho et al., 2021; Oh et al., 2018; Van de Walle et al., 2023). Sebesar 50-70% dari timbulan air limbah domestik merupakan *greywater* dan kandungan fraksi organiknya sebesar 30% serta kandungan nutriennya adalah 9-20% (Van de Walle et al., 2023). Timbulan *greywater* berkorelasi erat dengan aktivitas manusia sehingga pemanfaatan *greywater* dapat menjadi jawaban untuk pemenuhan kebutuhan air bersih suatu kawasan mengingat terdapat dua keunggulan terkait pemanfaatan sumber air lokal/dalam kawasan (*local water source*) yaitu untuk mereduksi timbulnya biaya tinggi akibat perlunya transmisi air dari sumber luar kawasan dan dapat meningkatkan kemampuan beradaptasi serta resiliensi sumber air lokal (Van de Walle et al., 2023).

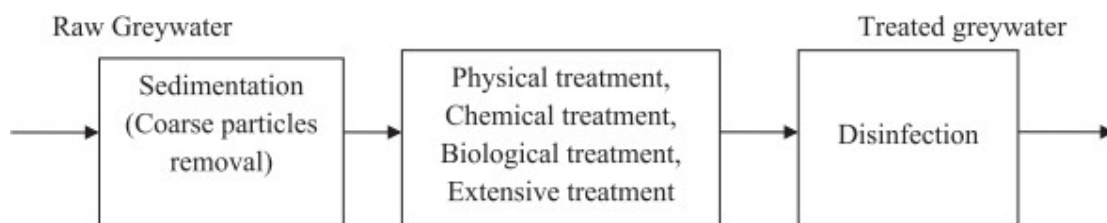
Pada umumnya, sistem *greywater recycling* terdiri atas tiga komponen yaitu pengumpulan *raw greywater*, sistem pengolahan dan penampungan hasil olahan, dan distribusi air hasil olahan. Air hasil aktivitas mencuci, mandi, dan kebersihan dapur dikumpulkan dalam tangki pengumpulan *greywater* lalu dialirkan ke sistem pengolahan. Dalam beberapa kondisi, *raw greywater* harus melalui penyaringan (*screening*) dan sedimentasi untuk memisahkan padatan terapung (*suspended solids*) serta *coarse particles* dari air olahan sebelum memasuki proses pengolahan lebih lanjut (Oh et al., 2018).



Gambar 17. Skema Sistem Greywater Recycling Skala Rumah Tangga

Sumber: (Van de Walle et al., 2023)

Dalam praktiknya, terdapat beberapa metode pengolahan *greywater* yaitu teknologi pengolahan biologis (RBC, Biofilm, MBR, dan lainnya), pengolahan fisika-kimiawi (*membrane filtration*, *sorption* dan *ion exchange*, dan lainnya), hingga *nature-based solution* (*constructed wetlands*, *green roofs*, *green walls*, dan lainnya) (Oh et al., 2018; Van de Walle et al., 2023). Sistem pengolahan *greywater* dapat menyesuaikan dengan karakteristik air yang akan diolah dan target kualitas hasil olahan sesuai dengan peruntukan penggunaan air hasil olahan nantinya.



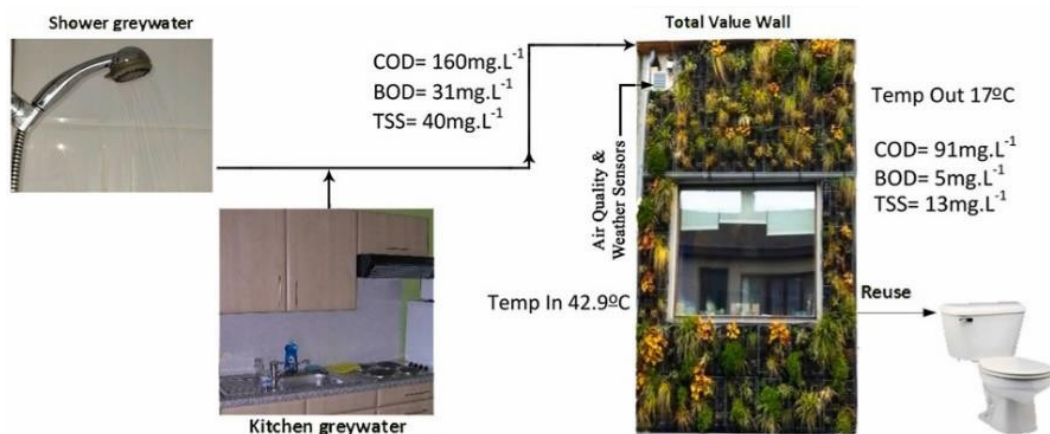
Gambar 18. Alur Pengolahan *Greywater*

Sumber: (Oh et al., 2018)

3.4.1.1 *Greywater Recycling*

1. Belgia

Pemanfaatan *greywater* dilakukan dalam sebuah studi di sebuah hunian berlokasi di kota Ghent, Belgia dengan memanfaatkan *nature-based solution* yaitu *greenwall*. Dalam penelitian yang dilakukan oleh (Lakho et al., 2021) menggunakan *greywater* dengan nilai *oxygen demand* sebesar 596 mg/L, nitrogen 5,58 mg/L, dan fosfor sebesar 0,06 mg/L, COD sebesar 160 mg/L, BOD5 sebesar 31 mg/L, dan TSS sebesar 40 mg/L. Adapun *greywater* berasal dari aktivitas kamar mandi (mandi dan air hasil aktivitas di wastafel) dan dari aktivitas kebersihan di dapur (wastafel dapur) yang dialirkan secara gravitasional ke tangki penampungan.



Gambar 19. Karakteristik Greywater dan Skema Alur Pengolahan

Sumber: (Lakho et al., 2021)

Skema pengaliran *greywater* ke *greenwall* diilustrasikan pada Gambar 19 dimana *greywater* dialirkan menggunakan pompa ke *greenwall* lalu dialirkan menggunakan pipa dan diteteskan (*drip line irrigation*) ke media pengolahan (garis berwarna biru) dengan jarak antar penetes/*dripper* 0,5 m. Air hasil olahan kemudian dikumpulkan menggunakan talang air pada bagian bawah (garis berwarna kuning). Luasan *greenwall* adalah 4,2 m x 4.8 m yang dibagi menjadi dua zona yang terdiri atas 20 panel (setiapnya berukuran 60 x 60 x 10 cm dan dipasangkan *iron mesh frame* dengan kantung media tanam yang berisi 25,6 kg media per panel). Jenis tumbuhan yang digunakan adalah *Carex morrowii*, *Acorus gramineus*, *Mazus reptans*, *Ajuga reptans*, *Deschampsia cespitosa*, *Geum rivale*, *Heuchera hybrid*, *Houttuynia cordata*, *Campanula posharskyana*, *Geranium wlassovianum*, dan *Hemerocallis hybrid*.



Gambar 20. *Greenwall* dipasang pada Dinding Luar Hunian (Ghent, Belgia)

Sumber: (Lakho et al., 2021)

Pada tahapan awal penelitian tersebut, dilakukan pemilihan media dengan nilai penyisihan COD dan detergen paling optimum, nilai *water holding capacity* (WHC) dan *hydraulic residence time* (HRT) paling tinggi, dan *material loss* paling rendah (berdasarkan nilai TSS). Nilai WHC harus cukup tinggi untuk bisa menghadapi musim kering atau saat rendahnya pasokan *greywater* tetapi nilai WHC tidak boleh terlalu tinggi agar tidak membebani rangka *greenwall*. Sedangkan nilai HRT merupakan keseimbangan/titik tengah antara kemampuan pengolahan *greywater* yang baik (durasi HRT lebih lama) dan biaya yang rendah (semakin tinggi nilai *hydraulic loading rate* maka ukuran unit pengolahan akan lebih kecil). Diperoleh media dengan komposisi 50% *lava rock*, 25% tanah, dan 25% *biochar*. Hasil efisiensi penyisihan (Tabel 13) menunjukkan bahwa *greenwall* dapat menyisihkan TSS sebesar 67% (dari 40 mg/L menjadi 13 mg/L), BOD5 sebesar 83% (dari 31 mg/L menjadi 5 mg/L), dan COD sebesar 43% (dari 160 mg/L menjadi 91 mg/L). Air hasil olahan memiliki kandungan mikroba (koliform dan *Legionella*) dengan nilai rendah.

Ditemukan pula bahwa penggunaan tanah organik mengakibatkan terjadinya fenomena *nutrient leaching* yang memiliki nilai manfaat untuk tanaman tetapi mempengaruhi kualitas efluen karena warna efluen menjadi kekuningan disebabkan adanya kandungan *humic acid*.

Tabel 13. Karakteristik Air Olahan (Influen) dan Hasil Olahan (Efluen) *Total Value Wall (Greenwall)*

Parameter	Influen				Efluen				Mean Removal (%)
	Min	Max	Mean	STDEV	Min	Max	Mean	STDEV	
pH	6.2	8.7	7.4	0.7	6.1	8.5	7.5	0.5	-
Turbidity (NTU)	7.3	286	73	95	1.2	29.5	10	10	86
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	549	1007	793	146	678	1262	919	209	-
TSS (mg/L)	10.4	135	40	30	1	70	13	18	67
VSS (mg/L)	5.5	38	17	9	0	58	11	16	35
COD (mg/L)	69.8	466	160	103	21.5	452	91	108	43
BOD5 (mg/L)	13	49	31	12	1.8	12.5	5	3	83
TN(mgN/L)	4	41.7	12	11	1.7	27	11	9	8
NH ⁺ -N4 (mgN/L)	0.13	25	3	6	0	0.2	0.08	0.07	97
NO ⁻ -N3 (mgN/L)	0.02	2.1	0.7	0.6	0.1	23.5	5.9	6.8	
PO ³⁻ -N4 (mgP/L)	0.03	8.9	1.1	2.3	0.3	7.3	3.6	2.6	
E-Coli (cfu/100 mL)	0	4.00 E+03	5.00 E+02	1.51 E+03	ND	ND	ND	ND	
Total coliform (cfu/100 mL)	2.00E+05	2.60E+06	1.27E+06	1.04E+06	2.00E+03	2.20E+04	1.06E+04	8.13E+03	log (2)

Sumber: (Lakho et al., 2021)

2. Kanada

Upaya daur ulang air untuk pemenuhan kebutuhan masyarakat juga dilakukan di Kanada walaupun memiliki sumber air yang berlimpah dengan sumber utama dari *Great Lake* dan sungai-sungai yang bersumber dari gletser, salju, dan hujan. Hal tersebut dilakukan akibat adanya potensi penggunaan air permukaan dan air tanah yang berlebih akibat perkembangan kota/wilayah dan peningkatan kepadatan penduduk (Van Rossum,

2020). Fenomena krisis iklim mengakibatkan gletser semakin cepat meleleh sehingga mengancam pasokan air jangka panjang untuk kawasan Kanada bagian barat (*Western Provinces*). Wilayah Kanada yang luas tetapi memiliki banyak wilayah yang gersang juga mendorong pemanfaatan air kawasan (*local water source*) untuk pemenuhan kebutuhan air. Kanada memiliki target pemanfaatan ulang air hasil olahan yaitu untuk kebutuhan *toilet flushing*, irigasi dan pertamanan, mencuci mobil, mandi, mencuci pakaian, pemanas, hingga pendingin. Kota Guelph yang terletak di selatan Ontario melakukan upaya konservasi air melalui *greywater reuse* skala rumah tangga (25 rumah). Pemerintah kota Guelph juga menawarkan insentif sebesar 1500 dolar Kanada (CAD kepada kontraktor rumah untuk setiap rumah baru yang dipasangkan *greywater reuse system* (GWRS) dan 1500 CAD untuk pemilik rumah yang memasang *greywater reuse system* (GWRS) (The Corporation of the City of Guelph, 2012).

Terdapat dua jenis teknologi GWRS yang digunakan untuk 25 rumah yaitu *Brac Greywater Reuse System* dan *iDus Controls' Conserve Pump system*. Sebanyak 24 rumah memilih menggunakan *Brac Greywater Reuse System* dan satu rumah memiliki menggunakan *iDus Controls' Conserve Pump system* (The Corporation of the City of Guelph, 2012). Adapun *raw greywater* berasal dari timbunan aktivitas mandi. Secara umum, kedua opsi teknologi memiliki sistem yang sama yaitu filtrasi *raw greywater* menggunakan *bag* atau *catridge filter* untuk menghilangkan partikulat dan sabun. Namun pada opsi *Brac Greywater Reuse System* dilengkapi dengan unit disinfeksi dimana *raw greywater* dialirkan melewati *chlorine puck* sehingga air terdisinfeksi dan memiliki kandungan *free chlorine residual* pada air hasil olahan untuk mencegah pertumbuhan mikroba saat disimpan dalam tangki penyimpanan (The Corporation of the City of Guelph, 2012). Kedua sistem didesain untuk dapat menambahkan air bersih ke dalam tangki penyimpanan apabila jumlah air hasil olahan yang tersimpan tidak dapat memenuhi kebutuhan minimum untuk *toilet flushing*.



Gambar 21. Unit Brac Greywater Reuse System (kiri) dan iDus Controls' Conserve Pump system (kanan)

Sumber: (The Corporation of the City of Guelph, 2012)

Opsi teknologi *Brac Greywater Reuse System* juga dilengkapi dengan sistem resirkulasi dimana air hasil olahan yang sudah tersimpan dalam tangki pada rentang waktu yang cukup lama akan disirkulasikan ulang ke unit disinfeksi lalu disimpan kembali ke tangki penyimpanan. Rentang waktu resirkulasi dari opsi teknologi *Brac Greywater Reuse System* dapat diatur oleh pemilik rumah. Sedangkan opsi teknologi *iDus Controls' Conserve Pump system* secara aktif membersihkan *greywater* yang disimpan dalam waktu 48 atau 72 jam untuk mengelola pertumbuhan bakteri tanpa adanya desinfeksi klorin.

Secara umum, implementasi GWRS telah berhasil mereduksi kebutuhan air rumah tangga sebesar 22,6 L/kapita/hari (The Corporation of the City of Guelph, 2012). Namun jumlah penggunaan air yang berhasil direduksi berkaitan erat dengan penggunaan *toilet flushing* (mengingat air hasil olahan hanya digunakan untuk kebutuhan *toilet flushing*), sehingga penggunaan unit toilet (kloset, urinoir) yang lebih efisien akan mengurangi jumlah air yang digunakan untuk *flushing*. Dalam hal kualitas air olahan, GWRS belum berhasil mencapai target baku mutu yang ditentukan oleh *Health Canada Guidelines* dimana hanya 15,4% sampel yang memenuhi baku mutu kekeruhan (5 NTU), 28,7% yang memenuhi baku mutu BOD (20 mg/L), 8,9% yang memenuhi baku mutu COD (20 mg/L). Namun, terdapat 90,1% sampel yang berhasil memenuhi baku mutu *E.coli* (<200 cfu/100mL) (The Corporation of the City of Guelph, 2012). Hasil efluen yang kurang optimal berkorelasi erat dengan sistem pengolahan dari kedua teknologi GWRS tersebut. Terdapat tiga tingkatan/*tier* teknologi berdasarkan kompleksitas unit dan biaya, yaitu (The Corporation of the City of Guelph, 2012):

- a. *Tier 1* (250-500 CAD): terdiri dari sistem pengumpulan *greywater*, filtrasi, disinfeksi, dan penggunaan air olahan untuk kebutuhan *toilet flushing*
- b. *Tier 2* (3.000-4500 CAD): sistem dapat digunakan untuk kebutuhan rumah tangga, semi komersial, dan komersial. Teknologi GRWS *Brac Greywater Reuse System* dan *iDus Controls' Conserve Pump system* termasuk dalam kategori ini
- c. *Tier 3* (7.000-20.000 CAD): sistem dapat mengolah *greywater* dengan volume lebih tinggi dan menggunakan teknologi pengolahan yang lebih kompleks (e.g., pra-filtrasi, disinfeksi lanjutan, pengolahan biologis, aerasi, sedimentasi, sterilisasi UV, dan *pressure pump*). Sistem kategori ini digunakan untuk mengolah *greywater* secara menyeluruh dengan target penyisihan polutan yang lebih tinggi

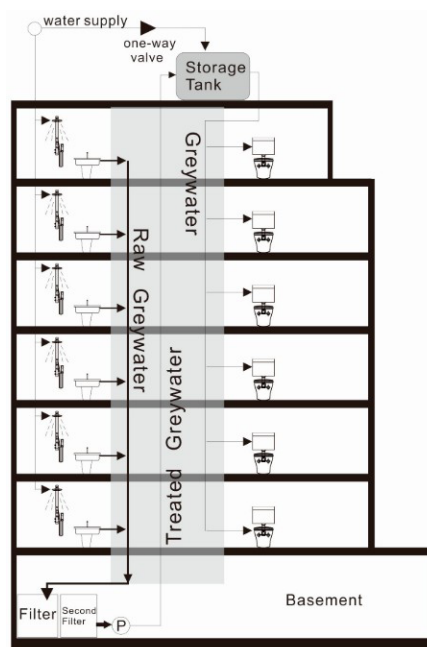
3. Taiwan

Tingginya angka kepadatan penduduk dan rendahnya curah hujan di Taiwan mendorong untuk dilakukannya optimalisasi pemanfaatan air. Taiwan merupakan urutan ke-18 dalam aspek kekurangan air menurut PBB. Nilai rata-rata konsumsi air harian per orang di Taiwan adalah sebesar 274 L yang mana lebih tinggi dibandingkan dengan rekomendasi

PBB (250 L/hari/kepala), bahkan konsumsi air mencapai 335 L/hari/kepala di Taipei (Juan et al., 2016). Sebesar 27% dari total penggunaan air di Taiwan adalah untuk *toilet flushing* dan penggunaan air untuk kebutuhan rumah tangga mencapai 10% dari total konsumsi air nasional di Taiwan (Juan et al., 2016). Oleh karena itu, *greywater recycling* menjadi opsi yang sangat dipertimbangkan untuk mendukung skema pengelolaan air berkelanjutan di Taiwan. Dalam penelitian yang dilakukan oleh (Juan et al., 2016), sistem *Interior Customized Greywater System (ICGS)* diperkenalkan sebagai solusi untuk pengolahan *greywater* pada hunian (dalam hal ini unit apartemen) yang ditinggali oleh empat orang. Sistem ICGS dapat disesuaikan dengan luasan ruang yang ada sehingga cukup fleksibel. Pada umumnya, sistem konvensional *greywater reuse* pada hunian bertingkat (apartemen) di Taiwan terdiri atas tiga subsistem, yaitu (Juan et al., 2016):

1. Pengumpulan *raw greywater*: menggunakan jaringan perpipaan untuk mengumpulkan air dari aktivitas mandi dan mencuci (wastafel)
2. Jaringan penyaluran dan pengolahan *greywater*: air limbah yang terkumpul kemudian disalurkan ke unit pengolahan yang terletak di *basement* gedung. Air hasil olahan kemudian dipompa ke tangki penyimpanan yang ada di atap gedung
3. Distribusi air hasil olahan: distribusi dilakukan secara gravitasional ke setiap unit apartemen

Sistem konvensional tersebut memiliki kekurangan yaitu tingginya biaya perawatan untuk sistem penyaringan dan peralatan pendukung sistem serta sulitnya pemantauan penggunaan air di setiap unit apartemen.

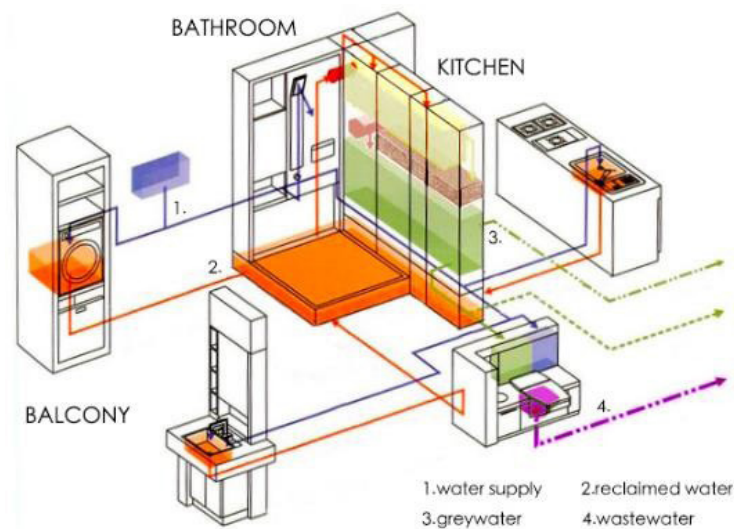


Gambar 22. Ilustrasi sistem konvensional *greywater reuse* pada hunian bertingkat (apartemen) di Taiwan

Sumber: (Juan et al., 2016)

Sistem ICGS menggunakan *greywater* dari air hasil kegiatan mandi, mencuci pakaian, dan mencuci alat makan (kebersihan dapur) sebagai influen. Kualitas air terbagi menjadi dua kelas yaitu:

1. Kelas I: air bersih (untuk mandi, mencuci pakaian dan alat makan)
2. Kelas II: *recycled and processed greywater* (untuk *toilet flushing*, menyiram tumbuhan) Pada Gambar 23 diilustrasikan sistem jaringan air dalam unit apartemen berdasarkan kualitas air dimana garis biru adalah Air Kelas I, garis hijau adalah Air Kelas II, garis ungu adalah air limbah (*blackwater*), dan garis merah adalah air hasil olahan. Hanya air kelas II yang akan diolah dalam unit ICGS.



Gambar 23. Diagram Alir ICGS

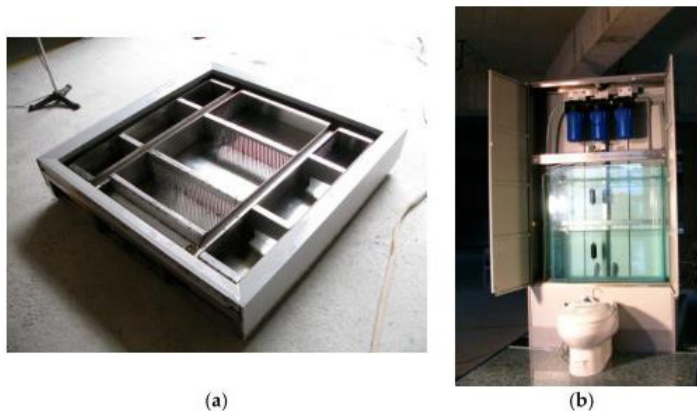
Sumber: (Juan et al., 2016)

Sistem ICGS terdiri atas tangki penampungan hasil olahan *greywater*, unit penyaringan, motor penggerak (e.g. pompa distribusi), dan empat subsistem distribusi. Subsistem distribusi dapat disesuaikan dengan konfigurasi lantai dan ketersediaan ruang dalam unit hunian tersebut (Juan et al., 2016). Adapun kapasitas penyimpanan air olahan didesain untuk dapat memenuhi kebutuhan air lima orang dalam hunian tersebut. Pengolahan *greywater* dalam sistem ICGS terbagi menjadi tiga komponen, yaitu:

1. Pemilahan dan pengendapan: tangki pengumpulan *greywater* dipasang dan dilakukan proses filtrasi serta sedimentasi (tahapan preliminar) dari pengotor (e.g., rambut)
2. Filtrasi: terdapat tiga tahapan filtrasi dengan menggunakan tiga media filtrasi berbeda yaitu filter *polypropylene* (untuk menyisihkan padatan seperti pasir, lumpur, hingga mikroorganisme), filter *granular activated coal* (menyisihkan bau, warna, gas klorin, hingga senyawa kimia), dan filter *mesh activated carbon* (menyisihkan klorin hingga *chemical organic pollutant*)

3. Sterilisasi: proses sterilisasi air hasil olahan menggunakan sinar UV anti bakteri.

Air hasil olahan akan disimpan dalam tangki penyimpanan dan digunakan untuk kebutuhan *toilet flushing* dan kebutuhan *non-potable water* lainnya. Diestimasikan penggunaan sistem ICGS dalam mereduksi penggunaan air rumah tangga hingga 55%.



Gambar 24. Desain Unit Pengolahan *Greywater*: (a) Unit Penyaringan dan Pengendapan Awal; (b) Unit Filtrasi, Sterilisasi, dan Tangki Penyimpanan Air Hasil Olahan

Sumber: (Juan et al., 2016)

3.4.1.2 Hybrid Greywater Recycling

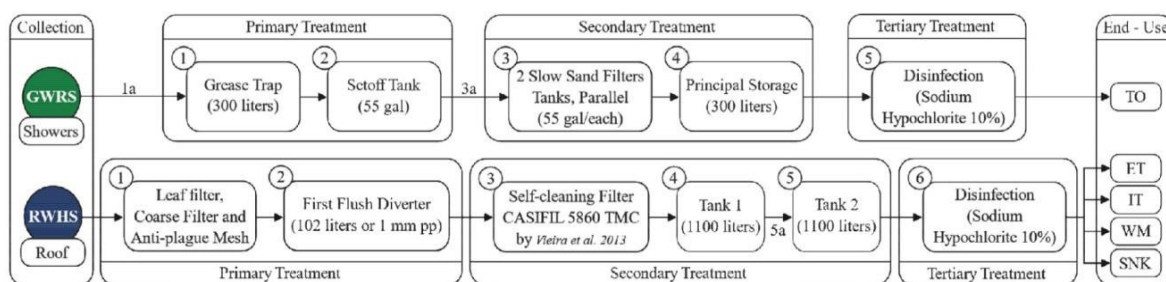
Sebagai upaya pemanfaatan air secara menyeluruh, pemanfaatan *greywater* dilakukan pula bersamaan dengan pemanfaatan air hujan menggunakan metode *rainwater harvesting* yang kemudian disebut sebagai teknologi *hybrid*. Secara sederhana, teknologi *hybrid* tersebut memungkinkan dilakukannya *greywater recycling* dan *rainwater harvesting* dilakukan pada satu bangunan gedung serta dimanfaatkan sesuai peruntukannya. Sehingga, pemanfaatan sumber air alternatif dapat dioptimalkan dan menekan angka penggunaan air bersih dari sistem penyediaan air.

Dalam penelitian yang dilakukan di Kolombia pada rumah tiga lantai dengan lima kamar mandi yang dihuni oleh empat orang, luas rumah adalah 216 m² dan luas atap sebesar 101 m² (Gómez-Monsalve et al., 2022; Oviedo-Ocaña et al., 2018). Diketahui bahwa rata-rata konsumsi air adalah sebesar 203 L/kepala/hari. Dalam penelitian tersebut diidentifikasi besaran efisiensi konsumsi air dengan menyediakan sistem *greywater recycling* dan *rainwater harvesting* pada satu hunian. Sumber *greywater* hanya berasal dari aktivitas mandi (*showering*), hal tersebut dikarenakan karakteristik *physicochemical* yang lebih baik dibandingkan dengan instalasi sanitasi lainnya (e.g., bak cuci piring, wastafel,

dan lainnya) (Oviedo-Ocaña et al., 2018). Pengolahan *greywater* dan *rainwater harvesting* terdiri atas tiga unit pengolahan yaitu *primary treatment*, *secondary treatment*, dan *tertiary treatment* dengan hasil olahan digunakan untuk kebutuhan non-konsumsi dimana hasil olahan *greywater recycling* akan digunakan untuk *toilet flushing* dan air hasil olahan *rainwater harvesting* akan digunakan untuk mencuci pakaian, kran air luar rumah, kran air dalam rumah, dan air wastafel (Gómez-Monsalve et al., 2022; Oviedo-Ocaña et al., 2018).

Baik untuk *greywater recycling* maupun *rainwater harvesting*, dalam menentukan teknologi pengolahan yang akan digunakan perlu mempertimbangkan penerimaan dan kemampuan pengguna teknologi tersebut. Dilakukan survey terkait penerimaan penggunaan sumber air alternatif (*greywater* dan *rainwater*) untuk kebutuhan rumah tangga, hasilnya lebih dari 90% dari 35 rumah tangga bersedia menggunakan sumber air alternatif tersebut. Selain itu, sebanyak 94% bersedia untuk melakukan perawatan unit setiap 2 minggu sekali, 83% bersedia jika setiap 1 minggu sekali, 34% bersedia jika 2 kali seminggu, dan 9% bersedia jika setiap hari (Oviedo-Ocaña et al., 2018). Dengan mempertimbangkan hal tersebut, perlu dipilih teknologi pengolahan yang dapat mengakomodir kondisi-kondisi pengguna sehingga teknologi tersebut dapat tetap beroperasi menghasilkan air olahan yang memenuhi target baku mutu pengolahan. Adapun teknologi pengolahan yang dipilih adalah sebagai berikut (Gómez-Monsalve et al., 2022; Oviedo-Ocaña et al., 2018):

1. *Greywater Recycling*
 - a. *Primary Treatment*
 - i. *Grease trap* (kapasitas 300 liter)
 - ii. *Setoff tank* (kapasitas 55 galon)
 - b. *Secondary Treatment*
 - i. *Slow sand filter tank* (2 unit parallel, kapasitas 55 galon setiap unit)
 - ii. *Principal storage* (kapasitas 300 liter)
 - c. *Tertiary Treatment*
 - i. Unit disinfeksi (NaClO 10%)
2. *Rainwater Harvesting*
 - a. *Primary Treatment*
 - i. *Filter* (*leaf filter*, *coarse filter*, *anti-plague mesh*)
 - ii. *First flush diverter* (kapasitas 102 liter atau 1 mm pp)
 - b. *Secondary Treatment*
 - i. *Self-cleaning filter* (merek CASIFIL 5860 TMC)
 - ii. Tangki penampungan (2 unit, kapasitas 1.100 liter per unit)
 - c. *Tertiary Treatment*
 - i. Unit disinfeksi (NaClO 10%)



Gambar 25. Diagram Alir Proses Pengolahan Air Skema *Hybrid*

Sumber: (Gómez-Monsalve et al., 2022; Oviedo-Ocaña et al., 2018)

Adapun parameter kualitas yang dipantau adalah pH, TSS, kekeruhan, total coliform, dan *E.coli* (Oviedo-Ocaña et al., 2018). Penerapan teknologi *hybrid* tersebut berhasil menghemat 60,7 m³/tahun atau 19,6% (*greywater recycling*) dan 70,6 m³/tahun atau 22,8% (*rainwater harvesting*) penggunaan air minum dari sistem penyediaan air untuk kebutuhan non-konsumsi (Gómez-Monsalve et al., 2022; Oviedo-Ocaña et al., 2018).

3.4.2 Regulasi dan Standar Teknis

Baku mutu air dalam konteks *greywater recycling* dan *wastewater reuse* terbagi menjadi dua menyesuaikan dengan target penggunaan yang dalam hal ini telah dijelaskan dalam RIT dan dokumen Pembaruan Konsep dan BED Air Limbah tahun 2022. Dalam hal *greywater recycling*, baku mutu yang digunakan adalah baku mutu air sesuai peruntukannya. Sedangkan dalam *wastewater reuse*, baku mutu yang digunakan adalah baku mutu air limbah (Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan nomor 68 tahun 2016) untuk target hasil olahan air limbah dan baku mutu air sesuai peruntukan penggunaan air daur ulang. Berkaitan dengan penggunaan air hasil olahan, berdasarkan dokumen RIT milik Kementerian PUPR, pemanfaatan air daur ulang pada KIPP adalah untuk kebutuhan *non-potable* yaitu *parcel gardening/landscape, cleaning/kebersihan* bangunan dan lanskap, *cooling tower* (dengan *pre-treatment* tertentu), dan sumber air pemadam kebakaran. Air daur ulang dapat dicampur dengan air RWH dan digunakan untuk kebutuhan tersebut. Jaringan air daur ulang nantinya akan dipisahkan dari air minum dan diidentifikasi dengan warna ungu. Mengacu kepada detail tersebut, target kualitas air limbah olahan berdasarkan dokumen Pembaruan Konsep dan BED Air Limbah tahun 2022 adalah sebagai berikut:

Tabel 14. Target Kualitas Efluen IPAL Domestik IKN

Parameter	Unit	PerMen LHK 68/2016	Target Pengolahan IPAL KIPP IKN	Permenkes 02/2023 (Hygiene Sanitasi)	Catatan
pH	-	6-9	6-8	6.5 - 8.5	
BOD	mg/l	30	15	-	Perlu BOD <15 ppm untuk sisihkan amonia dan nitrogen
COD	mg/l	100	50	-	Batas toleransi organik <i>non-biodegradable</i>
TSS	mg/l	30	20	-	Degradasi organik tersuspensi
Oil and Grease	mg/l	5	5	-	
Amonia (NH ⁺ - N) ₄	mg/l	10	5	-	Dengan pertimbangan pengolahan nitrit, ammonia-N perlu capai <5 ppm
Total Coliform	N/ 100ml	3000	1000	0	
E. coli	N/ 100ml	-		0	
Suhu	°C	-	-	Suhu udara ±3	
Total Dissolved Solid	mg/L	-	-	<300	
Kekeruhan	NTU	-	-	<3	
Warna	TCU	-	-	10	
Bau	-	-	-	Tidak berbau	
Nitrat (sebagai NO ₃) (terlarut)	mg/L	-	-	20	

Parameter	Unit	PerMen LHK 68/2016	Target Pengolahan IPAL KIPP IKN	Permenkes 02/2023 (Hygiene Sanitasi)	Catatan
Nitrit (sebagai NO ₂) (terlarut)	mg/L	-	1	3	Cegah karsinogenik timbul karena nitrifikasi tidak sempurna
Kromium valensi 6 (Cr ⁶⁺) (terlarut)	mg/L	-	-	0.01	
Besi (Fe) (terlarut)	mg/L	-	-	0.2	
Mangan (Mn) (terlarut)	mg/L	-	-	0.1	
Fosfat (PO ₄)	mg/L	-	1	-	Parameter utama pengendali eutrofikasidan pencemaran sekunder (penyisihan min.75%)

Sumber: Dokumen Pembaruan Konsep dan BED Air Limbah tahun 2022 milik Direktorat Jenderal Cipta Karya Kementerian PUPR

3.4.3 Parameter dan sensor

3.4.3.1 Parameter Air Olahan dan Target Kualitas Hasil Olahan

Pemantauan kualitas *greywater* dilakukan untuk mengetahui karakteristik dan ketercapaian baku mutu dalam pengolahan airnya. Parameter pemantauan kualitas olahan berkorelasi erat dengan target penggunaan air olahan, yang dalam hal ini air olahan *greywater recycling* akan ditujukan untuk penggunaan *non-potable water*. Parameter pemantauan kualitas *greywater* yang dilakukan dalam berbagai penelitian didetailkan pada Tabel 15.

Tabel 15. Berbagai Parameter Pemantauan Kualitas *Greywater*

Parameter	Satuan	Belgia (Lakhoet al., 2021)	Van de Walleet al., 2023	Crete, Yunani (Fountoulakis et al., 2016)
pH		√	√	√
Kekeruhan	NTU	√	√	√
Konduktivitas	μS/cm	√		√
TSS	mg/L	√	√	√
TDS	mg/L		√	
VSS	mg/L	√	√	
COD	mg/L	√	√	√
BOD5	mg/L	√	√	
Total Nitrogen	mgN/L	√	√	√
NH ⁴⁺ -N	mgN/L	√		
NH ₃ -N	mg/L		√	
NO ₃ --N	mgN/L	√	√	
PO ₄ ³⁻ -N	mgP/L	√		
Anionik Surfaktan	mg/L			√
Total Fosfat	mg/L		√	√
E-Coli	cfu/100 mL	√		√
Total coliform	cfu/100 mL	√	√	√
Fecal Coliform	cfu/100 mL		√	
Na	mg/L		√	
Cl	mg/L		√	
Ca	mg/L		√	
S	mg/L		√	
Mg	mg/L		√	
K	mg/L		√	
Al	mg/L		√	
B	mg/L		√	
Fe	mg/L		√	
Zn	mg/L		√	
Cu	mg/L		√	
Ba	mg/L		√	

Sumber: (Fountoulakis et al., 2016; Lakho et al., 2021, 2022; Van de Walle et al., 2023)

Adapun untuk target baku mutu air sesuai peruntukan penggunaan air daur ulang dapat mengikuti target baku mutu peruntukan penggunaan air berdasarkan RIT dan BED. Mengacu kepada dokumen tersebut, baku mutu air olahan *greywater recycling* dan

wastewater reuse adalah Baku Mutu Air Higiene dan Sanitasi (Permenkes 2 tahun 2023) yang telah didetailkan pada Tabel 14. Berdasarkan studi literatur dan peraturan terkait baku mutu, parameter yang diusulkan untuk dilakukan pengukuran adalah pH, BOD, COD, TSS, minyak dan lemak, ammonia, *total coliform*, suhu air, TDS, kekeruhan, nitrat (NO₃) terlarut, dan nitrit (NO₂) terlarut.

3.4.3.2 Sensor

Penggunaan sensor untuk mengukur kualitas air olahan agar sesuai dengan target baku mutu dapat menggunakan sensor yang telah ada di pasaran, sesuai dengan target parameter yang akan dikur dan faktor biaya. Detail terkait sensor pengukuran kualitas air dapat dilihat pada lampiran dokumen ini. Adapun implementasi sensor pada *wastewater reuse* akan dibahas lebih lanjut pada Bab IV dari dokumen ini.

3.5 River Pollution Monitoring (RPM)

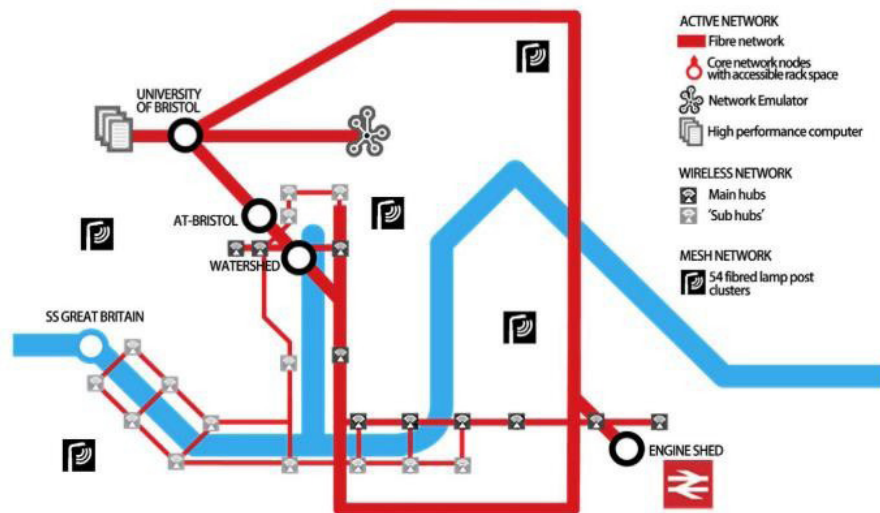
Pada sub – bab ini akan dibahas terkait pedoman literatur RPM di berbagai negara, jenis parameter dan sensor yang biasa digunakan dalam RPM, dan regulasi terkait RPM.

3.5.1 State-of-the-art

Pemantauan kualitas air sungai secara berkala dibutuhkan untuk memastikan kualitas air sungai memenuhi baku mutu sehingga dapat menopang sistem kehidupan biota sungai dan menjaga kesehatan manusia (Chen & Han, 2018; Singh et al., 2022). Urgensi untuk memastikan kualitas air sungai tetap dalam ambang batas baku mutu bersesuaian dengan target capaian SDG yaitu poin 3 terkait “Kesehatan yang Baik dan Kesejahteraan”, poin 6 yaitu terkait “Akses Air Bersih dan Sanitasi”, poin 14 terkait “Menjaga Ekosistem Laut”, dan poin 15 terkait “Menjaga Ekosistem Daratan”. Berbagai metode konservatif dalam pemantauan kualitas air sungai memiliki kekurangan terkait efisiensi waktu, pengiriman sampel uji, hingga proses analisis sehingga potensi *human error* dapat terjadi yang kemudian dapat menurunkan akurasi pengukuran (Singh et al., 2022). Dengan berkembangnya teknologi, pemanfaatan *smart system* dilakukan untuk menghasilkan akurasi data yang lebih tinggi hingga menghasilkan pelaporan kualitas air sungai secara *real-time*. Pemantauan secara *real-time* tersebut memanfaatkan *Internet of Things* (IoT) dengan menggunakan jaringan telekomunikasi (e.g., Wi-Fi, GPRS, *fiber optic* dan lainnya) untuk mentransmisikan data dari unit sensor ke pusat data dan diterjemahkan ke dalam berbagai bentuk penyajian data (e.g., grafik, statistik, kurva, dan lainnya) sehingga memudahkan *user* untuk menilai dan mengambil keputusan.

3.5.1.1 Bristol, Inggris

Pemanfaatan IoT untuk kebutuhan pemantauan kualitas air sungai telah dilakukan oleh pemerintah kota Bristol (*Bristol City Council*) bekerjasama dengan *University of Bristol* melalui program *Bristol is Open* (BIO). Dikembangkan “*City Experimentation as a Service*” (CEaaS) dalam program tersebut sehingga memungkinkan dilakukannya permodelan dan eksperimen lingkungan terhadap kota Bristol dengan bantuan IoT tanpa mengganggu layanan perkotaan (Chen & Han, 2018).



Gambar 26. Infrastruktur Bristol Is Open

Sumber: (Chen & Han, 2018)

Pemantauan kualitas air sungai dilakukan di tiga lokasi yang tersebar di kawasan sungai dan tepi pelabuhan kota Bristol. Lokasi tersebut dipilih berdasarkan cakupan jaringan BIO Wi-Fi, aksesibilitas lokasi, dan keamanan (Chen & Han, 2018).



Gambar 27. Lokasi Pemantauan Kualitas Air Sungai, Kota Bristol, Inggris

Sumber: (Chen & Han, 2018)

Digunakan satu unit sensor pengukur kualitas air *multi-parameter water quality sonde* Aqua Troll 600 untuk mengukur kualitas air (dipasangkan pada kedalaman 50 cm dari permukaan air sungai), kamera Hikvision IP Network Camera DS-2CD2042WD-I untuk merekam kondisi sungai di titik pengukuran, dan unit termometer untuk mengukur suhu air. Unit sensor pengukur kualitas air terbagi atas empat modul, yaitu (Chen & Han, 2018):

1. Modul DO: mengukur parameter DO (mg/L), saturasi oksigen dan *oxygen partial pressure*
2. Modul pH: mengukur pH (dalam satuan nilai pH dan mV) dan ORP (mV)
3. Modul *turbidity*: mengukur kekeruhan (NTU) menggunakan *optical nephelometers*. Modul juga melakukan konversi nilai kekeruhan menjadi nilai TSS
4. Modul konduktivitas: mengukur nilai konduktivitas air dan mengkalkulasikan konduktivitas spesifik dengan suhu air

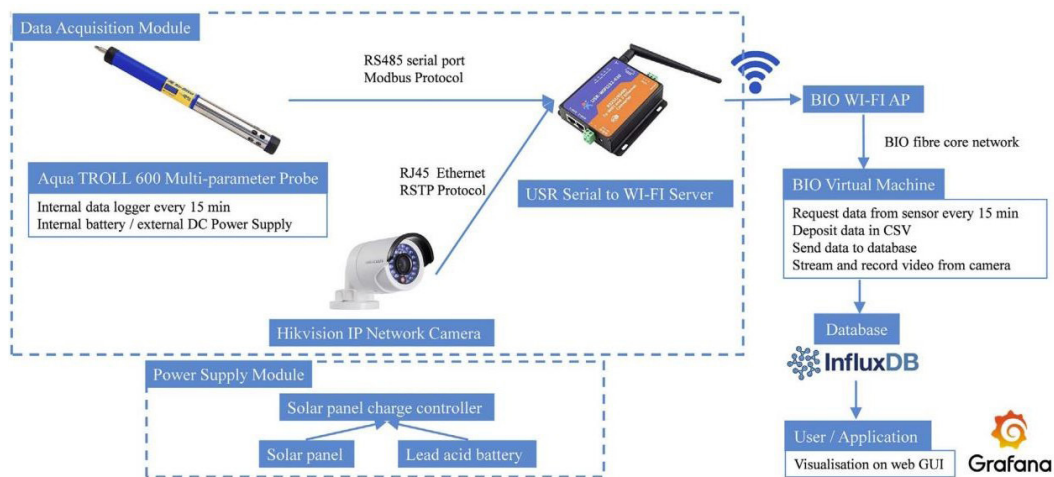


Fig. 4. General design of the wireless water quality monitoring system.

Gambar 28. Skema Transmisi Informasi Sistem Pemantauan Kualitas Air Sungai, Kota Bristol, Inggris

Sumber: (Chen & Han, 2018)

Unit *data acquisition* yang terdiri atas unit pemantauan kualitas air dan unit kamera tersambung ke unit Wi-Fi server USR-WIFI232-630 dengan sambungan RS485 Modbus *protocol* (unit pemantauan kualitas air) dan sambungan RJ45 *ethernet RSTP protocol* (unit kamera) sehingga bisa tersambung dengan BIO Wi-Fi Network. Dengan tersambungnya unit *data acquisition* ke jaringan BIO Wi-Fi Network, sistem BIO *Virtual Machine* (BIO VM) dapat melakukan *request data* setiap 15 menit ke unit *data acquisition* dan dikirimkan ke *database* untuk kemudian divisualisasikan melalui Grafana (*web-based GUI Platform*), *user* bisa memantau secara langsung melalui laman *website* ataupun aplikasi terkait. Dengan mengatur ambang batas tertentu pada parameter yang ada, *user* bisa mendapatkan notifikasi terkait status kualitas badan air melalui *email* atau aplikasi lainnya.



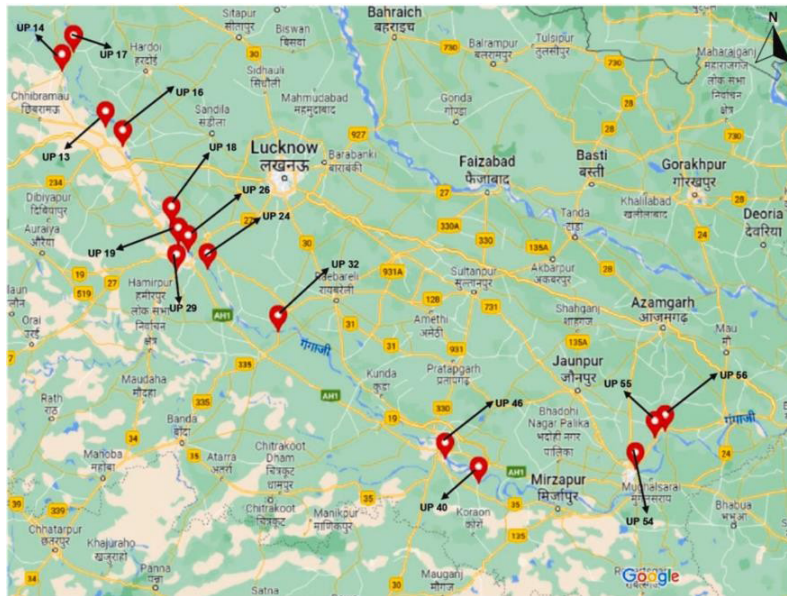
Gambar 29. Tampilan Antarmuka Visualisasi Data *Real-Time* menggunakan *Web-Based GUI*

Sumber: (Chen & Han, 2018)

Unit sensor pemantauan kualitas air menggunakan energi listrik dari panel surya sedangkan unit kamera dan Wi-Fi *server* menggunakan *lead acid battery* yang ditenagai oleh panel surya. Unti sensor memiliki dua baterai *D-Cell Alkaline* (daya tahan 9 bulan) dan juga disambungkan ke *lead acid battery* untuk tenaga cadangan.

1.5.1.2 India

Pemantauan kualitas air permukaan dilakukan di sungai Ganga, India dengan memanfaatkan *Internet of Things* (IoT) yang disebut sebagai *Real-Time Water Quality Monitoring System* (RTWQMS). Tujuan implementasi IoT dalam pemantauan kualitas air sungai Ganga adalah untuk mengidentifikasi sumber pencemar serta wilayah yang terdampak, dan membuat sistem peringatan yang memungkinkan pihak berwenang untuk segera mengambil tindakan (Singh et al., 2022). Terdapat 15 titik pemantauan yang tersebar di sepanjang sungai Ganga, khususnya pada bintang sungai di kawasan Uttar Pradesh dikarenakan pada lokasi tersebut terdapat 815 industri (industri kimia, penyulingan/*distillery*, makanan dan minuman, kertas, gula, tekstil, penyamakan, dan lainnya) yang membuang air limbah ke sungai (Singh et al., 2022).

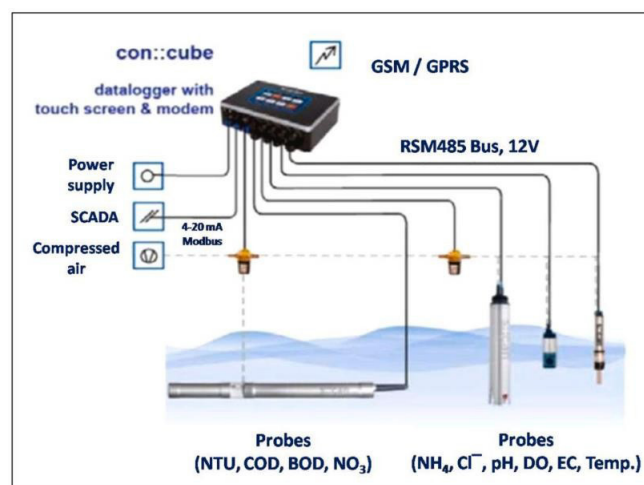


Gambar 30. Titik Lokasi Unit RTWQMS di Sungai Ganga (Bentang Uttar Pradesh)

Sumber: (Singh et al., 2022)

Prinsip kerja dari RTWQMS didasarkan pada sistem SCADA dan *data logger* terdiri dari unit “Con::cube” untuk menerima nilai parameter kualitas air yang berbeda dari unit sensor pengukur kualitas air. Terdapat 16 parameter kualitas air yang dipantau menggunakan lima unit alat berbeda yang disambungkan ke unit “Concube”, yaitu (Singh et al., 2022):

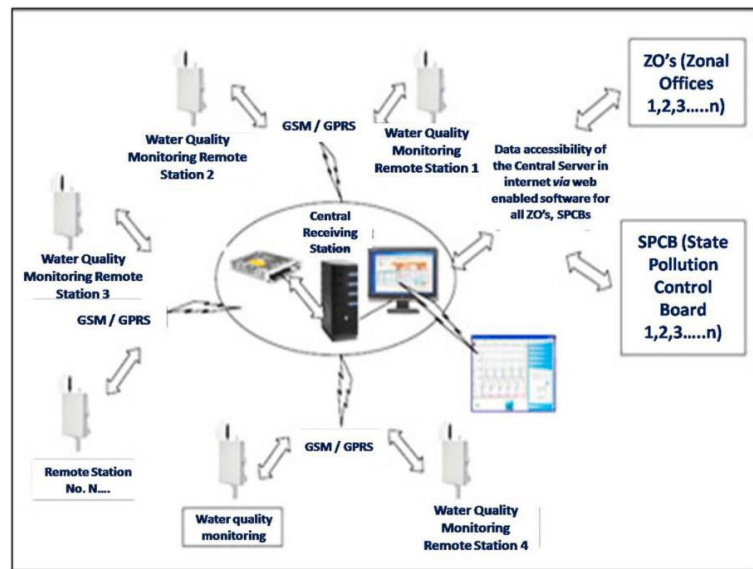
1. Spectrolyser (BOD, COD, TOC, TSS, BTX, kekeruhan, warna, dan nitrat)
2. Ammolysers (pH, kalium, dan amonia bebas)
3. Oxilyser (DO dan suhu air)
4. Florolysers (klorida dan fluorida)
5. Condulysers (konduktivitas)



Gambar 31. Konektivitas Unit Sensor Pemantauan Kualitas Air dengan Unit “Con::cube”

Sumber: (Singh et al., 2022)

Data dari kelima sensor tersebut kemudian ditransmisikan ke unit “Con::cube” dan ditampilkan. Data kemudian ditransmisikan secara nirkabel (memanfaatkan jaringan GSM/GPRS) ke unit “Moni::tool” dan diproses lebih lanjut untuk kemudian ditransmisikan secara *real-time* (pengiriman data setiap lima menit) ke *central database* milik *Central Pollution Control Board (CPCB)* India.



Gambar 32. Konektivitas Komunikasi Seluruh Unit RTWQMS

Sumber: (Singh et al., 2022)

3.5.2 Regulasi dan Standar Teknis

Baku mutu air sungai di Indonesia telah diatur dalam Peraturan Pemerintah nomor 22 tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup pada Lampiran VI. Berdasarkan peraturan tersebut, air sungai dibagi menjadi empat kelas kualitas berdasarkan peruntukan penggunaan air sungai, yaitu:

1. Kelas 1: air yang peruntukannya digunakan untuk air baku air minum, dan/atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut
2. Kelas 2: air yang peruntukannya digunakan untuk prasarana/sarana rekreasi air, budidaya ikan air tawar, peternakan, air untuk mengairi pertanian, dan/atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut
3. Kelas 3: air yang peruntukannya digunakan untuk budidaya ikan air tawar, peternakan, air untuk mengairi pertanian, dan/atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut
4. Kelas 4: air yang peruntukannya digunakan untuk mengairi pertanian, dan/atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut

Berdasarkan klasifikasi tersebut, nilai setiap parameter kualitas air sungai adalah sebagai berikut:

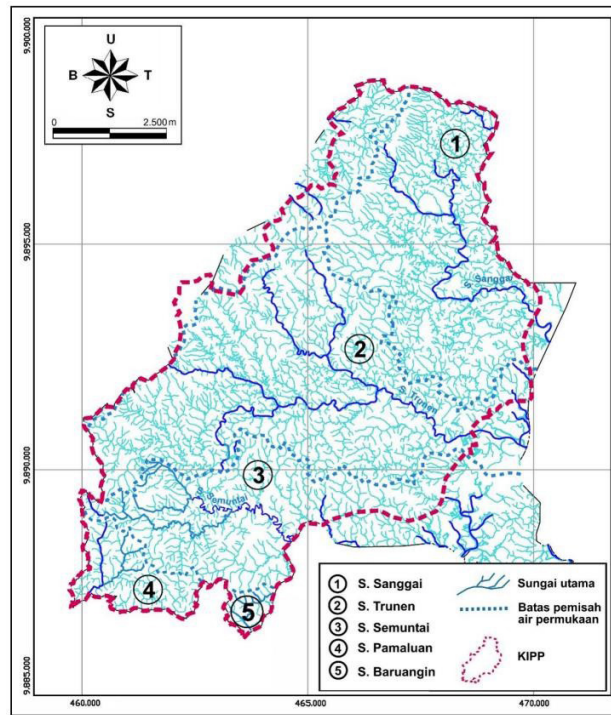
Tabel 16. Baku Mutu Air Sungai di Indonesia

No	Parameter	Unit	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3	Kelas 4
1	Temperatur	°C	Dev 3	Dev 3	Dev 3	Dev 3
2	Padatan terlarut total (TDS)	mg/ L	1000	1000	1000	2000
3	Padatan tersuspensi total(TSS)	mg/L	40	50	100	400
4	Warna	Pt-Co Unit	15	50	100	-
5	Derajat keasaman (pH)		6-9	6-9	6-9	6-9
6	Kebutuhan oksigenbiokimiawi (BOD)	mg/ L	2	3	6	12
7	Kebutuhan oksigen kimiawi (COD)	mg/L	10	25	40	80
8	Oksigen terlarut (DO)	mg/L	6	4	3	
9	Sulfat (SO ₄ ²⁻)	mg/L	300	300	300	400
10	Klorida (Cl ⁻)	mg/L	300	300	300	600
11	Nitrat (sebagai N)	mg/ L	10	10	20	20
12	Nitrit (sebagai N)	mg/L	0,06	0,06	0,06	
13	Amoniak (sebagai N)	mg/ L	0,1	0,2	0,5	
14	Total Nitrogen	mg/L	15	15	25	
15	Total Fosfat (sebagai P)	mg/ L	0,2	0,2	1,0	
16	Fluorida (F ⁻)	mg/ L	1	1,5	1,5	
17	Belerang sebagai H ₂ S	mg/ L	0,002	0,002	0,002	
18	Sianida (CN ⁻)	mg/L	0,02	0,02	0,02	
19	Klorin bebas	mg/L	0,03	0,03	0,03	
20	Barium (Ba) terlarut	mg/L	1			
21	Boron (B) terlarut	mg/L	1	1	1	1
22	Merkuri (Hg) terlarut	mg/L	0,001	0,002	0,002	0,005
23	Arsen (As) terlarut	mg/ L	0,05	0,05	0,05	0,10
24	Selenium (Se) terlarut	mg/ L	0,01	0,05	0,05	0,05
25	Besi (Fe) terlarut	mg/L	0,3			
26	Kadmium (Cd) terlarut	mg/ L	0,01	0,01	0,01	0,01
27	Kobalt (Co) terlarut	mg/ L	0,2	0,2	0,2	0,2
28	Mangan (Mn) terlarut	mg/ L	0,1			
29	Nikel (Ni) terlarut	mg/ L	0,05	0,05	0,05	0,1
30	Seng (Zn) terlarut	mg/L	0,05	0,05	0,05	2
31	Tembaga (Cu) terlarut	mg/ L	0,02	0,02	0,02	0,2
32	Timbal (Pb) terlarut	mg/ L	0,03	0,03	0,03	0,5
33	Kromium heksavalen (Cr-(VI))	mg/ L	0,05	0,05	0,05	1

No	Parameter	Unit	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3	Kelas 4
34	Minyak dan lemak	mg/L	1	1	1	10
35	Deterjen total	mg/L	0,2	0,2	0,2	
36	Fenol	mg/L	0,002	0,005	0,01	0,02
37	Aldrin/Dieldrin	µg/ L	17			
38	BHC	µg/ L	210	210	210	
39	Chlordane	µg/ L	3			
40	DDT	µg/ L	2	2	2	2
41	Endrin	µg/ L	1	4	4	
42	Heptachlor	µg/ L	18			
43	Lindane	µg/ L	56			
44	Methoxychlor	µg/ L	35			
45	Toxapan	µg/ L	5			
46	Fecal Coliform	MPN/ 100 mL	100	1000	2000	2000
47	Total Coliform	MPN/ 100 mL	1000	5000	10000	10000
48	Sampah		nihil	nihil	nihil	nihil
49	Radioaktivitas					
	Gross-A	Bq/L	0,1	0,1	0,1	0,1
	Gross-B	Bq/L	1	1	1	1

Sumber: Lampiran VI PP nomor 22 tahun 2021

Berdasarkan dokumen Laporan Akhir Penyusunan Rencana Induk Terintegrasi Infrastruktur Dasar Permukiman (RIT) tahun anggaran 2021 milik Direktorat Jenderal Cipta Karya Kementerian PUPR, terdapat lima sungai yang mengalir melintasi Kawasan Inti Pusat Pemerintahan (KIPP) Ibu Kota Nusantara, yaitu Sungai Sanggai, Sungai Trunen, Sungai Semuntai, Sungai Pamaluan, dan Sungai Baruangin. Kelima sungai tersebut mengalir dari arah barat ke timur dan bermuara di Teluk Balikpapan.



Gambar 33. Sungai di Wilayah KIPP IKN

Sumber: Laporan Akhir Penyusunan Rencana Induk Terintegrasi Infrastruktur Dasar Permukiman tahun anggaran 2021

Daerah Aliran Sungai Sanggai (DAS Sanggai) atau Sepaku (Lestari et al., 2023) merupakan sumber air baku untuk kebutuhan air minum KIPP IKN. Mengacu kepada dokumen *Basic Engineering Design* Air Minum tahun anggaran 2021 milik Direktorat Jenderal Cipta Karya Kementerian PUPR, kualitas air baku akan mengacu kepada kualitas air sungai kelas 1 pada Lampiran VI PP nomor 22 tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Telah dilakukan pengujian kualitas air sungai tersebut dan diperoleh data sebagai berikut:

Tabel 17. Hasil Uji Kualitas Air Baku Sungai Sepaku

No	Parameter Uji	Satuan	Baku Mutu Kualitas Air Permukaan Kelas1 (PP 22/2021)	Baku Mutu Air Minum Rekomendasi	Hasil Uji Kualitas Air Baku		
					SEPAKU (SURUT)	SEPAKU (PASANG)	SEPAKU (HUJAN)
A	FISIKA						
1	Warna	Pt Co	-	15 TCU	39	15	197
2	Kekeruhan	NTU	-	1	27,9	34,7	475
3	Suhu	°	Suhu Udara + 3°	Suhu Udara + 3°	24	24,1	25,7
4	Zat Padat Terlarut (TDS)	mg/L	1000	100	95	66	48
5	pH	-	6,0 - 9,0	6,5-8,5	6,8	7	6,42
B	KIMIA						
6	Kesadahan Total	mg/L (CaCO ₃)	-	150 mg/l (60 mg/l Ca)	57,86	55,76	37,51
7	Mangan (Mn)	mg/L	0,1	0,02	0,03	<0,02	<0,02
8	Besi (Fe)	mg/L	0,3	0,3	0,66	0,37	1,81
9	Nitrit (dalam NO ₂ ⁻)	mg/L	0,06	0,1	0,05	0,02	0,03
10	Nitrat (dalam NO ₃ ⁻)	mg/L	0,06	10 (NO ₃)	<0,12	<0,12	<0,12
11	Seng (Zn)	mg/L	0,05	3,0	<0,02	<0,02	<0,02
12	Zat Organik (dalam KMnO ₄)	mg/L	-	10,0	1,58	3,16	22,12
13	Sulfat (SO ₄)	mg/L	400	250,0	7	4	23
14	Arsen	mg/L	0,05	0,01	<0,001	<0,001	<0,001
15	Fluorida (F)	mg/L	0,5	0,6	<0,02	<0,02	<0,02
16	Kromium (CR ⁺⁶)	mg/L	0,05	0,07	<0,02	<0,02	<0,02
17	Cadmium (Cd)	mg/L	0,01	0,003	<0,001	<0,001	<0,001
18	Merkuri	mg/L	0,001	0,001	<0,0005	<0,0005	<0,0005
19	Sianida	mg/L	0,02	0,07	<0,02	<0,02	<0,02
20	Selenium	mg/L	0,01	0,01	<0,001	<0,001	<0,001
C	MIKROBIOLOGIS						
21	Total Koliform	JPT/100mL	1,E+03	0,00	0,0,E+00	0,E+00	1,E+01
22	Koliform Tinja	JPT/100mL	1,E+02	0,00	0,0,E+00	0,E+00	0,E+00

Sumber: Dokumen Basic Engineering Design Air Minum tahun anggaran 2021 milik Direktorat Jenderal Cipta Karya Kementerian PUPR

3.5.2.1 Regulasi dan Standar Pemantauan Kualitas Air Permukaan

Peletakan unit pemantauan kualitas air sungai merujuk kepada peraturan dan standar terkait yang telah diterapkan di Indonesia. Dalam Lampiran III pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup nomor 5 tahun 2021 tentang Tata Cara Penerbitan Persetujuan Teknis

dan Surat Kelayakan Operasional Bidang Pengendalian Pencemaran Lingkungan, dalam konteks dilakukannya pembuangan air limbah ke badan air permukaan, dijelaskan bahwa titik pemantauan badan air permukaan terbagi menjadi dua bagian yaitu hulu dan hilir. Pada hulu, pengambilan contoh uji dilakukan di lokasi antara lokasi pembuangan air limbah usaha dan/atau kegiatan di sekitar yang telah beroperasi dengan lokasi rencana pembuangan air limbah usaha dan/atau kegiatan lainnya. Pada bagian hilir, titik pengambilan contoh uji dilakukan sebelum lokasi pembuangan air limbah usaha dan/atau kegiatan yang telah beroperasi di bagian hilir. Untuk badan air permukaan berupa danau, lokasi pengambilan contoh uji didasarkan pada prediksi sebaran polutan yang ditetapkan pejabat penerbit Persetujuan Teknis.

Berdasarkan SNI 03-7016-2004 tentang Tata Cara Pengambilan Contoh Dalam Rangka Pemantauan Kualitas Air pada Suatu Daerah Pengaliran Sungai, pemilihan lokasi pengambilan contoh air harus mempertimbangkan:

- a. Kualitas air sebelum adanya pengaruh kegiatan manusia, yaitu pada hulu sungai (sebagai *baseline station* untuk ketahui kualitas alamiah)
- b. Pengaruh kegiatan manusia terhadap kualitas air dan pengaruhnya untuk pemanfaatan tertentu (*impact station*)
- c. Sumber pencemar yang dapat memasukkan zat berbahaya ke badan air agar mengetahui sumber penyebaran bahan berbahaya. Dapat berlokasi di hulu atau hilir sungai bergantung pada sumber dan jenis zat berbahaya (apakah alami atau buatan)

Selain itu, dapat dipertimbangkan pula terkait dengan sarana eksisting yang ada di badan air tersebut untuk dimanfaatkan sebagai sarana pengambilan contoh, seperti:

- a. Jembatan
- b. Pos pengukur debit air (dapat memanfaatkan unit pencatat tinggi muka air dan ditambahkan unit pemantauan kualitas air)
- c. Bendung (dapat memanfaatkan unit pencatat tinggi muka air dan ditambahkan unit pemantauan kualitas air)

Lokasi yang ditentukan harus dapat menggambarkan terkait kualitas air alami dan kualitas air akibat aktivitas manusia, sehingga dapat teridentifikasi perubahan kualitas air untuk kemudian dilakukan pengambilan keputusan. Perubahan kualitas air dapat diketahui dengan menempatkan titik pengambilan contoh kualitas air di hilir sungai, setelah melalui pemukiman, setelah melalui industri dan pertanian. Diperlukan pula titik pengambilan

contoh kualitas air di setiap pemanfaatan sumber air tersebut (e.g., IPAM, industri, perikanan, rekreasi, dan lainnya). Pada muara sungai juga perlu ada titik pengambilan contoh kualitas air untuk mengetahui pengaruh intrusi air laut. Menurut SNI-06-2412-1991 tentang Metode Pengambilan Contoh Kualitas Air, titik pengambilan contoh di sungai dikategorikan menjadi tiga, yaitu:

- a. Sungai dengan debit $< 5 \text{ m}^3/\text{detik}$: di tengah sungai pada $0,5x$ kedalaman dari permukaan air
- b. Sungai dengan debit $5-150 \text{ m}^3/\text{detik}$: dilakukan pada dua titik berjarak masing-masing $1/3$ dan $2/3$ lebar sungai pada $0,5x$ kedalaman dari permukaan air
- c. Sungai dengan debit $> 150 \text{ m}^3/\text{detik}$: dilakukan pada minimal enam titik dengan masing-masing berjarak $1/4$, $1/2$, dan $3/4$ lebar sungai pada $0,2x$ dan $0,8x$ kedalaman dari permukaan air

Dalam SNI yang sama, dijelaskan pula terkait frekuensi pengambilan contoh air yang mempertimbangkan perubahan kualitas air (disebabkan perubahan kadar unsur yang masuk ke badan air, kecepatan aliran, dan volume air), waktu pengambilan contoh air (disebabkan perubahan kualitas air disetiap waktu), dan debit air (disebabkan pengaruh debit air terhadap kadar zat pada badan air). Frekuensi pengambilan contoh air dapat mengikuti rekomendasi studi pendahuluan, namun jika studi tersebut belum terlaksana maka dapat dilakukan setiap dua minggu (untuk sungai), setiap delapan minggu (untuk waduk atau danau), dan setiap 12 minggu (untuk air tanah).

3.5.2.2 Regulasi dan Standar Sistem *Surface Water Quality Online Monitoring*

Berkaitan dengan penerapan sistem *online monitoring*, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan melalui Direktorat Jenderal Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan telah menerbitkan peraturan Direktur Jenderal nomor P.8/PPKL/PPA/PKL.2/8/2019 tentang Petunjuk Teknis Pelaksanaan Pemantauan Kualitas Air Secara Otomatis, Kontinyu dan Online. Dalam pasal 3 peraturan tersebut, dijelaskan bahwa pemantauan kualitas air dilaksanakan melalui tahapan penentuan lokasi pemantauan, pengadaan peralatan *remote terminal unit* di lokasi pemantauan, pengadaan bangunan pelindung, pengadaan peralatan *display*, pengadaan dan pembangunan pusat data, dan pengoperasian alat pemantauan.

1. Lokasi Pemantauan

Lokasi pemantauan ditentukan dengan mengacu pada kriteria yang dijelaskan dalam pasal 4, yaitu:

1. Terdapat pada DAS prioritas, danau prioritas nasional, atau sungai dan/atau danau yang telah tercemar

2. Tidak tergenang air dan bebas banjir
3. Aman dari gangguan binatang dan pencurian
4. Berada dalam jangkauan sinyal salah satu operator GSM dengan sinyal kuat atau sinyal internet yang kuat
5. Mudah dijangkau, tersedia akses jalan dalam pemasangan dan perawatan
6. Dekat dengan pengambilan/*intake* air sebagai bahan baku air minum
7. Dekat pembuangan air limbah usaha dan/atau kegiatan
8. Tujuan strategis nasional (PLTA, irigasi, pariwisata)

Selain itu, pada Peraturan Direktur Jenderal Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan nomor P.7/PPKL/PPA/PKL.2/3/2019 tentang Petunjuk Operasional Pemantauan Kualitas Air Permukaan Secara Kontinyu, Otomatis, Online, dan Terintegrasi, dijelaskan pula kriteria lainnya dalam menentukan lokasi pemantauan, yaitu:

1. Lokasi merepresentasikan karakteristik badan air dan lokasi sumber pencemar serta kemungkinan pencemaran akan ditimbulkannya
2. Merupakan bagian dari badan air yang dapat menggambarkan karakteristik keseluruhan badan air, sehingga perlu diketahui kuantitas atau debit airnya
3. Tidak dipengaruhi pasang surut air laut
4. Jenis sumber pencemar yang masuk ke badan air yaitu sumber pencemar setempat (*point source*) sehingga terkait dengan keberadaan pencemar maka lokasi pemantauan dapat dilakukan pada lokasi:
 - a. Sumber alamiah (belum pernah atau masih sedikit alami pencemaran seperti di hulu, inlet, waduk/danau, zona perlindungan)
 - b. Sumber tercemar (lokasi yang alami perubahan atau bagian hilir sumber pencemar seperti di daerah hilir badan air, outlet danau/waduk, zona pemanfaatan)
 - c. Sumber air yang dimanfaatkan (lokasi penyadapan/pemanfaatan sumber air)
Lokasi pemantauan ditentukan setelah melakukan koordinasi dengan pihak terkait, melakukan survey lapangan untuk memastikan kesesuaian lokasi dengan kriteria, dan membuat perjanjian kerjasama dengan pemilik lokasi.

2. *Remote Terminal Unit*

Setelah lokasi ditentukan, alat *remote terminal unit* (RTU) akan dipasangkan pada lokasi tersebut. Alat RTU meliputi:

1. *Multiprobe sensor* sebagai sistem pengukuran sampel air (parameter BOD, COD, DO (RDO), pH, suhu air, TSS, TDS, ammonia, dan tinggi muka air)

2. *Smart data logger* sebagai sistem pengendali pemantauan kualitas air untuk lokasi *remote area* atau *data logger* berbasis computer sebagai sistem pengendali pemantauan kualitas air
3. Sumber energi yang terdiri dari panel surya, aki kering, *solar cell controller*, dan pembatas arus sebagai sistem kelistrikan perangkat *remote terminal unit*

Pengukuran sampel air dapat dilakukan dengan cara celup langsung (sensor dicelup langsung ke badan air) atau tidak langsung (sampel air dipompa dan dialirkan ke wadah penampung lalu diukur kualitasnya dengan sensor). Untuk cara pengukuran tidak langsung, dibutuhkan pengadaan sistem perpipaan dan pompa yang meliputi perpipaan pengambilan sampel secara tidak langsung dari inlet ke bak penampung, otomatisasi kontrol aliran di perpipaan dari inlet menuju bak penampung kembali ke sungai, tangki untuk pencelupan sensor *multiprobe*, dan pompa untuk memompa air dari sumber air ke bak penampungan.

Berkaitan dengan sensor, dalam Peraturan Direktur Jenderal Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan nomor P.7/PPKL/PPA/PKL.2/3/2019 tentang Petunjuk Operasional Pemantauan Kualitas Air Permukaan Secara Kontinyu, Otomatis, Online, dan Terintegrasi dijelaskan terdapat tiga pilihan spesifikasi teknis *multiprobe sensor* seperti pada Tabel 18. Adapun spesifikasi teknis sensor yang digunakan untuk pemantauan pada Lampiran II Peraturan Direktur Jenderal Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan nomor P.8/PPKL/PPA/PKL.2/8/2019 dijelaskan pada Tabel 19.

Tabel 18. Opsi Spesifikasi Teknis *Multiprobe Sensor*

	Pilihan 1	Pilihan 2	Pilihan 3
Ketentuan Umum	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor telah dikenal dan terbukti telah digunakan untuk memantau kualitas air secara online di berbagai sumber air (dalam maupun luar negeri) • Dapat mengukur minimal 9 parameter standar 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor telah dikenal dan terbukti telah digunakan untuk memantau kualitas air secara online di berbagai sumber air (dalam maupun luar negeri) • Dapat mengukur minimal 10 parameter standar 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor telah dikenal dan terbukti telah digunakan untuk memantau kualitas air secara online di berbagai sumber air (dalam maupun luar negeri) • Dapat mengukur minimal 11 parameter standar

		Pilihan 1	Pilihan 2	Pilihan 3
Parameter	BOD			0,1 ~ 200 mg/L atau lebih tinggi
	COD		0,1 ~ 800 mg/L	0,1 ~ 800 mg/L
	Suhu Air	-5 ~ 50°C	-5 ~ 50°C	-5 ~ 50°C
	DO	0 ~ 15 mg/L	0 ~ 15 mg/L	0 ~ 15 mg/L
	pH	0 ~ 14	0 ~ 14	0 ~ 14
	ORP	-1.400 ~ 1.400Mv	-1.400 ~ 1.400Mv	-1.400 ~ 1.400Mv
	Kekeruhan	0 ~ 4.000 NTU, dan/ atau TDS 0 ~ 10.000 mg/L, dan/ atau TSS 0 ~ 1.000 mg/L	0 ~ 4.000 NTU, dan/ atau TDS 0 ~ 10.000 mg/L, dan/ atau TSS 0 ~ 1.000 mg/L	0 ~ 4.000 NTU, dan/ atau TDS 0 ~ 10.000 mg/L, dan/ atau TSS 0 ~ 1.000 mg/L
	Salinitas	50 PSU	50 PSU	50 PSU
	Amonia	0 ~ 10.000 mg/L sebagai N	0 ~ 10.000 mg/L sebagai N	0 ~ 10.000 mg/L sebagai N
	Nitrat	0 – 40 mg/L sebagai N	0 – 40 mg/L sebagai N	0 – 40 mg/L sebagai N
	Kedalaman/ tinggi muka air	0 ~ 200 m	0 ~ 200 m	0 ~ 200 m
Alat Pembersih Sensor Otomatis	Ya (<i>wiper, auto cleaning system for all sensor head</i>)	Ya (<i>wiper, auto cleaning system for all sensor head</i>)	Ya (<i>wiper, auto cleaning system for all sensor head</i>)	

Sumber: Peraturan Direktur Jenderal Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan nomor P.7/PPKL/PPA/PKL.2/3/2019

Tabel 19. Standar Teknis Syarat Minimum Sensor Pemantauan Kualitas Air Permukaan

No.	Parameter	Satuan	Rentang	Keterangan
1	BOD	mg/L	0,1-200 (atau setara)	<ul style="list-style-type: none"> Spesifikasi sensor boleh lebih baik dari ketentuan minimal Nilai pengukuran tidak boleh dari konversi nilai COD Menggunakan metode UV-Vis <i>Spectrophotometry multi-wavelength (double beam with entire spectrum scanning)</i>, 200 - 720 nm Harus dilakukan kalibrasi awal dengan laboratorium terakreditasi

No.	Parameter	Satuan	Rentang	Keterangan
2	COD	mg/L	0,1-800 (atau setara)	<ul style="list-style-type: none"> • Spesifikasi sensor boleh lebih baik dari ketentuan minimal • Menggunakan metode UV-Vis <i>Spectrophotometry multi-wavelength (double beam with entire spectrum scanning)</i>, 200 - 720 nm • Rentang <i>Open Path Length</i> (OPL) untuk spektrofotometer adalah 1 - 35 mm tergantung manufaktur. Semakin rapat OPL, semakin besar range yang diukur tapi resolusi semakin kecil • Harus dilakukan kalibrasi awal dengan laboratorium terakreditasi
3	Suhu	°C	-5 - 50	-
4	DO (RDO)	mg/L	0-50 atau 0-500%	<ul style="list-style-type: none"> • Menggunakan teknologi optik dengan fluorescencecap • <i>Cap DO</i> harus memiliki <i>life time</i> 2 tahun (minimal) • Nilai DO yang terbaca terkompensasi otomatis dengan nilai bacaansalinitas, tekanan, dan suhu untuk menambah akurasi
5	pH	-	0-14	<ul style="list-style-type: none"> • Teknologi sensor mengikuti standar USEPA 150.2 dimana sensor pH pemantauan jangka panjang tidak harus dikalibrasi tidak kurang dari 1 bulan sekali • Desain <i>reference electrode junction</i> yang stabil dan bisa diisi ulang (solid, gel, atau cairan) • Jika desain <i>reference electrode junction</i> gel atau solid, proses perbaikan/ penggantian harus mudah dan harga terjangkau (minimalisir <i>maintenance</i>)
				<ul style="list-style-type: none"> • Memiliki bahan sambungan keramik pada <i>reference electrode junction</i> untuk minimalisir kebocoran larutan sambil memberikan respons sensor yang cepat dan stabil • Memiliki sistem pembersihan sensor otomatis (e.g. <i>brush, wiper</i>, kompresi udara) • Terkompensasi dengan nilai sensor pH dan suhu untuk dapatkan akurasi sesuai perubahan kondisi

No.	Parameter	Satuan	Rentang	Keterangan
6	TDS	mg/L (ppm)	0-10.000	-
7	TSS	mg/L	0-1.500	Menggunakan metode UV-Vis <i>Spectrophotometry multi-wavelength (doublebeam with entire spectrum scanning)</i> , 200 - 720 nm
8	Amonia	mg/L	0-10.000 (sebagai Natau setara)	<ul style="list-style-type: none"> • Desain <i>reference electrode junction</i> yang stabil dan bisa diisi ulang (solid, gel, atau cairan) • Jika desain <i>reference electrode junction</i> gel atau solid, proses perbaikan/ penggantian harus mudah dan harga terjangkau (minimalisir maintenance) • Jika <i>reference electrode junction</i> menggunakan cairan, harus memiliki desain ruang <i>reference electrode junction</i> yang lebih besar agar bisa tampung lebih banyak cairannya • Memiliki bahan sambungan keramik pada <i>reference electrode junction</i> untuk minimalisir kebocoran larutan sambil memberikan respons sensor yang cepat dan stabil • Memiliki sistem pembersihan sensor otomatis (e.g. brush, wiper, kompresi udara) • Terkompensasi dengan nilai sensor pH dan suhu untuk dapatkan akurasi sesuai perubahan kondisi
9	Kedalaman/ tekanan/tinggi muka air	m	0-100	-

Sumber: Lampiran II Peraturan Direktur Jenderal Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan nomor P.8/PPKL/PPA/ PKL.2/8/2019

Terkait dengan alat *data logger*, persyaratan teknis yang tercantum pada lembar dokumen Peraturan Direktur Jenderal Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan nomor P.8/PPKL/PPA/PPKL.2/8/2019 adalah sebagai berikut:

1. Mampu beroperasi 24 jam tanpa pengawasan dengan jangka waktu lama

2. Menggunakan sistem memori yang tertanam dalam *logger* untuk merekam data sensor (minimal 1 GB dengan perekaman minimal 1 tahun). Sistem memori tertanam untuk menghindari kehilangan data dalam memori serta seluruh perekaman data terpusat di satu memori internal dalam *data logger*, memori bersifat *on-board* (tidak bisa dilepas pasang) dan permanen
3. Memiliki daya tahan penggunaan jangka panjang dan handal beroperasi di bawah kondisi lingkungan ekstrem (hingga 50°C) sambil mempertahankan pengukuran sensor yang telah dikalibrasi
4. Harus memiliki fasilitas validasi hasil data pengukuran dan bisa mengirimkan data tervalidasi oleh sistem *data logger* ke pusat data
5. Dapat berfungsi sebagai server lokal yang bisa dioperasikan jarak jauh (*remote*) secara langsung melalui jaringan lokal (LAN) dan internet dengan akses jaringan *private* tanpa melalui pihak lain (*server cloud*) dalam menampilkan hasil pengukuran, untuk pantau keseluruhan sistem berjalan
6. Dapat mengatur durasi *automatic cleaning sensor* dengan jangka waktu yang ditentukan
7. Memiliki slot GSM *sim card* dan slot *ethernet* (LAN) untuk terhubung ke jaringan pusat data
8. *Output data logger* bisa dihubungkan/diintegrasikan dengan sistem lain sesuai kebutuhan industri (e.g., memiliki Modbus TCP, Analog out 4-20Ma, Modbus RTU RS 485, Profibus dan SDI-12). Jika terjadi kegagalan pengiriman data (e.g., putus jaringan pada *data logger* ke pusat data), *data logger* wajib memiliki fitur pengembalian data melalui *flashdisk* atau pengambilan data manual sebagai cadangan
9. Memiliki fitur otomatis kirim data hasil pengukuran via SMS ke lebih dari satu nomor tujuan saat sensor sudah lakukan pengukuran jika di lokasi minim sinyal internet
10. Dapat dikomando melalui SMS (agar mudah *maintenance*) dan jika terjadi keadaan bahaya yang tidak memungkinkan operator untuk *shutdown data logger* secara langsung
11. Dapat dikomando melalui *automatic reply* SMS untuk meminta hasil pengukuran dengan Tujuan memverifikasi kebenaran data yang dikirim melalui internet
12. Memiliki kemampuan mengirim data ke *multi-server* dari setiap stasiun tanpa memakai PC atau server lain untuk mentransmisikannya
13. Memiliki kemampuan mengirim peringatan atau notifikasi ketika terjadi sesuatu (e.g., pengukuran melewati ambang batas, adanya masalah pada *data logger*)
14. Setiap parameter sensor yang dibaca *data logger* harus ada fitur analisis independent, validasi, dan kalibrasi pada *data logger*

Adapun spesifikasi teknis *data logger* dalam Peraturan Direktur Jenderal Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan nomor P.8/PPKL/PPA/PKL.2/8/2019 adalah:

1. Dapat mengatur interval waktu pengukuran sensor (minimal 60 menit per pengukuran)
2. Dapat menampung seluruh parameter yang disyaratkan
3. *Data logger*, sensor, dan perangkat *automatic cleaning sensor* terhubungan dalam satu kesatuan sistem di *data logger* yang bisa dipantau
4. Memiliki memori utama sebagai data primer hasil perekaman data sensor yang bisa dilihat langsung pada *data logger* melalui layar/*display* pada unit, dengan fitur yang bisa merepresentasikan data dalam bentuk grafik dengan interval waktu (per jam, hari, minggu, bulan, hingga waktu spesifik)
5. Dapat menampilkan kondisi status sensor (kondisi koneksi antara sensor ke *data logger* dalam keadaan terhubung atau tidak) yang sedang berjalan di *data logger*

Lebih lanjut, dalam Peraturan Direktur Jenderal Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan nomor P.7/PPKL/PPA/PKL.2/3/2019 dijelaskan spesifikasi teknis RTU apabila menggunakan *Smart Data Logger* GSM sebagai berikut:

Tabel 20. Spesifikasi Teknis RTU Apabila Menggunakan *Smart Data Logger* GSM

No	Komponen	Keterangan
1	Digital Input	8 port
2	Digital Output	4 port
3	Analog Input	4 channel 22-bit ADC dengan differential input
4	Analog Input Parameter	Referensi tegangan 2048 — 5000 mV
5	Analog Input Range	0 - 20 mA atau 0 — 5 volt tanpa pembagi tegangan
6	Analog Output	2 channel 12 bit DAC volt.
7	Flash Memory	2 Mbyte
8	Serial Data Port	1 port RS-232 dan 1 port RS-485 atau 3 port RS232
9	Catu Tegangan	8 - 30 volt
10	Konsumsi Arus	20 - 70 mA
11	Suhu Operasional	100 - 600C
12	Display Data	LCD 2x16 character, LED Indicator
13	Interval Time	Periodik dan EWS
14	Sampling Period	10, 15, 20, 30, 60 detik
15	Sampling Method	Komunikasi berbasis digital sensor serial dataProtocol

No	Komponen	Keterangan
16	Data Processing	Konversi dari format ASCII ke floating point
17	Metode Perekaman Data Periodik	Data periodik sesaat tiap 3 - 60 menit. Data rata-rata per jam
18	<i>Sistent Alarm (EventBased)</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Berdasarkan input digital dan analog, dapat digunakan untuk sistem pengaman alat & power failure monitoring 2. Berdasarkan input data serial (data sesaat) vs setting threshold value (baku mutu), dapat digunakan untuk deteksi dini pencemaran air (<i>Early Warning System/ EWS</i>) 3. Data alarm & time stamp direkam di flash memori local
19	<i>Alarm Action</i>	Digital Output, SMS
20	Media Komunikasi	GSM via Modem atau internet (port 80)
21	Metode KomunikasiData	SMS dua arah atau menggunakan API (metode POST & GET) dapat lintas platform
22	Jenis Modem	Serial GSM/GPRS
23	Metode Data Transfer	SMS otomatis, Standby Mode, Direct cable atau format JSON
24	Clock	Local RTC
25	Setting Parameter	<ul style="list-style-type: none"> • Via SMS (Server) • Direct Cable (<i>synchronization</i>)
26	Cek Pulsa Pra Bayar	Otomatis remote
27	Jumlah Running Tabel	2 (Dua) independen running table (time based tabel data dan event based tabel data)
28	Jumlah SensorParameter	6 - 15 parameter
29	Format Data Sensor	Floating point
30	Format ParameterKimia	ID Tgl Jam Temp Cond TDS DO pH Turbidity Depth Amonia Nitrat COD
31	Jenis Parameter Kirnia	Suhu, DO, pH, Turbidity, TDS, Depth, Amonia, Nitrat, ORP, COD
32	Format Parameter Fisik	ID Tgl Jam CurahHujan TMA Debit
33	Power Monitoring	Internal Monitoring tegangan aki kering
34	CCTV Monitoring (Jika Menggunakan CCTV)	sampai dengan 2 CCTV untuk pengambilan foto secara otomatis dan pengiriman ke FTP server dan perekaman di memori lokal kapasitas s/d 32 GB
35	CCTV Kontrol (Jika Menggunakan CCTV)	Manual / Auto , Timer periodic, 12-24 jam operasi, EWS trigger signal
36	Format File Data	8 bit PDU
37	Time-Stamp DataRecord	Tahun, Bulan, Tanggal, Jam, Menit

No	Komponen	Keterangan
38	Casing Material	Plastik / Alumunium
39	Indoor Casing	Indoor casing IP64 / PVC
40	Fuse Pengaman	2A
41	Output Display	Dapat menampilkan hasil sesaat ke running text

Sumber: Peraturan Direktur Jenderal Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan nomor P.7/PPKL/PPA/PKL.2/3/2019

Dalam peraturan tersebut juga disebutkan terkait *power management* yaitu menggunakan baterai/aki kering (12 VDC, 12 Ah) dan *solar cell panel* (50 WP).

3. Bangunan Pelindung

Dijelaskan dalam pasal 6 Peraturan Direktur Jenderal Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan nomor P.8/PPKL/PPA/PKL.2/8/2019, pengadaan bangunan pelindung meliputi bangunan sesuai dengan lokasi pemantauan (bisa berupa tiang pipa dan *box panel* berbahan galvanis atau aluminium, bangunan beton, atau bangunan rumah rakit dari kayu) dan tempat dudukan *solar cell* (bisa berupa *skid* dan tiang besi atau hanya diletakkan di atap bangunan pelindung). Dalam Peraturan Direktur Jenderal Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan nomor P.7/PPKL/PPA/PKL.2/3/2019, disebutkan bahwa terdapat dua jenis bangunan pelindung, yaitu:

1. Bangunan Pelindung di Sepadan Sungai
 - a. Bangunan Pelindung Permanen (jika menggunakan sistem pompa/celup langsung)
 - b. Bangunan Pelindung Tidak Permanen (jka menggunakan sistem celup langsung dan dipastikan kondisi lingkungan sekitarr benar-benar aman dan bebas banjir)
2. Bangunan Pelindung di Waduk atau Danau

4. Peralatan *Display Informasi*

Dalam pasal 7 Peraturan Direktur Jenderal Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan nomor P.8/PPKL/PPA/PKL.2/8/2019, pengadaan peralatan *display* ditujukan untuk menampilkan data dan informasi hasil pemantauan kualitas air secara otomatis, kontinyu, dan *online* yang menggunakan:

1. *Running text* untuk lokasi yang sering dilalui orang dan terdapat aliran listrik, serta menggunakan bangunan pelindung; atau

2. TV LCD untuk lokasi yang tidak atau jarang dilalui orang dan tidak terdapat aliran listrik

Jika anggaran mencukupi dan kondisi lapangan memungkinkan, peralatan *display* dapat menggunakan kedua opsi tersebut.

5. Pusat Data

Pengadaan pusat data dijelaskan pada pasal 8 Peraturan Direktur Jenderal Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan nomor P.8/PPKL/PPA/PKL.2/8/2019 harus meliputi peralatan pusat data dan sumber daya manusia. Peralatan pusat data terdiri dari:

1. Perangkat komputer berkonfigurasi server untuk pusat data yang dioperasikan terus menerus selama 24 jam
2. Perangkat lunak *database online monitoring* kualitas air
3. Perangkat lunak berbasis web sebagai sistem informasi pemantauan *online* kualitas air
4. Perangkat komunikasi data menggunakan modem GSM atau internet sebagai media komunikasi antara komputer pusat data dan *remote terminal unit*

Dalam Peraturan Direktur Jenderal Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan nomor P.7/PPKL/PPA/PKL.2/3/2019 dijelaskan bahwa alasan pemilihan teknologi jaringan komunikasi data menggunakan GSM atau internet adalah agar dapat menjangkau lokasi di *remote area*, sehingga memungkinkan komunikasi antara pusat data dan RTU di lokasi pemantauan dapat berlangsung tanpa membangun infrastruktur jaringan baru. Alat RTU terintegrasi dengan *hardware* dan *software* sistem monitoring di KLHK sebagai pusat data. Sumber daya manusia yang dialokasikan adalah tenaga ahli IT dan komputer serta tenaga analis laboratorium. Pengoperasian alat pemantauan dapat dilakukan dengan *remote* jarak jauh dan harus dilakukan pemeliharaan terhadap alat pemantauan secara harian, bulanan, dan berkala (validasi sistem dengan standar dan membandingkan dengan laboratorium), adapun kalibrasi parameter dilakukan setiap satu sampai tiga bulan sekali sesuai petunjuk manual dari manufaktur. Dilakukan uji konektivitas dan verifikasi nilai akurasi parameter untuk menjamin data hasil pengambilan sampel dapat diterima oleh pusat data KLHK. Pengujian dan verifikasi dilakukan oleh Direktur Pengendalian Pencemaran Air.

Pada Peraturan Direktur Jenderal Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan nomor P.7/PPKL/PPA/PKL.2/3/2019, dijelaskan terkait spesifikasi teknis pusat data yang terbagi menjadi enam yaitu spesifikasi komputer untuk server, spesifikasi perangkat UPS, fitur

software SMS Gateway, fitur *software database* kualitas air, fitur sistem informasi kualitas air berbasis web, spesifikasi teknis GSM modem.

1. Spesifikasi Teknis Pusat Data

- a. Tipe konfigurasi : server
- b. Prosesor : Intel Core i7
- c. Memori : 4 GB DDR3
- d. *Hard Drive* : 1TB HDD
- e. CD / DVROM : DVD±RW
- f. *VGA Card* : NVIDIA GeForce
- g. Layar : 22" SVGA LCD *Wide Screen*
- h. *Hardware Input* : *keyboard dan mouse*
- i. Sistem Operasi : Microsoft Windows 7 Professional
- j. Aplikasi Database : Microsoft Access 2007 Professional (Local)
- k. Aplikasi Server : Xampp (Apache Web Server, MySQL Database Server, PHP)
- l. Media Komunikasi : Serial Port GSM Modem

2. Spesifikasi Perangkat UPS

- a. Daya Listrik : 3.200 VA/1.600 Watt
- b. Fase Listrik : *Single Phase*
- c. Tipe *Casing* : Tower

3. Fitur *Software SMS Gateway*

- a. Berbahasa Indoneisa
- b. *Multi station monitoring*
- c. *Remote Control* melalui SMS dengan perintah AT
- d. *Early Warning System* (EWS)
- e. Parameter baku mutu bisa diset ulang
- f. Multi user SMS (pengguna yang dapat akses)
- g. Multi user EWS (pengguna yang dilapori EWS)
- h. Interval waktu (periodik dan EWS) data record dapat diatur
- i. Interval waktu pengiriman data dapat diatur
- j. *Record data* dalam format *text (pipe delimited)* dan format MS Access mdb
- k. Terdapat status baterai dan status memori data
- l. Menu *direct connection* untuk pengambilan data secara langsung di lapangan

- m. Instalasi mudah dengan *setup wizard*
 - n. Buku petunjuk pengoperasian dalam bahasa Indonesia
4. Fitur *Software Database* Kualitas Air
- a. Terintegrasi dengan *software SMS Gateway*
 - b. *File sharing* dengan *SMS Gateway* melalui *file* data dalam format *text*
 - c. Format *database* MS Access mde
 - d. Berbahasa Indonesia
 - e. Mengelola data *multi station* dan *multi data monitoring*
 - f. Dapat memonitoring data secara *online* dan *real-time*
 - g. Dapat menampilkan data dalam bentuk angka dan grafik
 - h. Laporan ringkas, rinci, dan lengkap
 - i. E-doc *online manual*, baku mutu dan regulasi
 - j. Penelusuran data harian/bulanan per stasiun
 - k. Utilitas *export* data ke format MS Excel
 - l. Peta untuk navigasi lokasi stasiun dan data pemantauan
 - m. Instalasi mudah dengan *setup wizard*
 - n. Buku petunjuk pengopreasian dalam bahasa Indonesia
5. Fitur Sistem Informasi Kualitas Air Berbasis Web
- a. Format *database* MySQL
 - b. Bebahasa Indonesia
 - c. Mengelola data *multi station* dan *multi data monitoring*
 - d. Dapat memonitoring data secara *online* dan *real-time*
 - e. Dapat menampilkan data dalam bentuk angka dan grafik
 - f. Laporan ringkas, rinci, dan lengkap
 - g. Memiliki informasi baku mutu, regulasi, berita iptek, dan artikel ilmiah
 - h. Penelusuran data harian/bulanan per stasiun
 - i. Sistem administrasi *database*
 - j. Sistem monitoring visual
 - k. Peta untuk navigasi lokasi stasiun dan data pemantauan
 - l. Buku petunjuk pengopreasian dalam bahasa Indonesia

6. Spesifikasi Teknis GSM Modem

Tabel 21. Spesifikasi Teknis Perangkat GSM Modem

No	Komponen	Keterangan
1	<i>Transmission</i>	Data, SMS, Fax
2	<i>GSM class</i>	<i>Small MS</i>
3	<i>Frequency bands</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Dual Band E-GSM 900 and GSM 1800</i> • <i>Compliant to GSM Phase 2/2+</i>
4	<i>Transmit power</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Class 4 (2W) for DGSM900</i> • <i>Class 1 (1W) for GSM1800</i>
5	<i>GPRS connectivity</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>GPRS multi-slot class 10</i> • <i>GPRS mobile station class B</i>
6	<i>SIM card reader</i>	<i>Internal</i>
7	<i>External antenna</i>	<i>Connected via antenna SMA connector</i>
8	<i>SMS</i>	<i>MT, MO, CB, Text and PDU mode</i>
9	<i>DATA</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>GPRS data downlink transfer: max. 85.6 kbps</i> • <i>GPRS data uplink transfer: max. 21.4 kbps</i> • <i>Coding scheme: CS- 1, CS-2, CS-3 and cs-4</i> • <i>TMAS GSM/GPRS Terminal supports the two protocols PAP (Password Authentication Protocol) and CHAP (Challenge Handshake Authentication Protocol) commonly used for PPP connections</i> • <i>Support of Packet Switched Broadcast Control Channel (PBCCH) allows you to benefit from enhanced GPRS performance when offered by the network operators</i> • <i>CSD transmission rates: 2.4, 4.8, 9.6, 14.4 kbps, nontransparent, V.110</i> • <i>Unstructured Supplementary Services Data (USSD) support</i>
10	<i>Serial Interface</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>RS-232 interface, bi-directional bus for AT commands & data</i> • <i>Multiplex ability according to GSM 07.10 Multiplexer protocol</i> • <i>Baud rates from 300bps to 115,200bps</i> • <i>Autobauding supports: 1,200, 2,400, 4,800, 9,600, 19,200, 38,400, 57,600 and 115,200bp</i>
11	<i>Supported SIM Card</i>	<i>3V</i>
12	<i>Phonebook Management Reset of TMAS GSM/GPRS</i>	<i>Supported phonebook types: FD, LD, MC, RC, ON, ME Reset via AT command Terminal</i>

Sumber: Peraturan Direktur Jenderal Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan nomor P.7/PPKL/PPA/PKL.2/3/2019

3.5.3 Parameter dan Sensor

3.5.3.1 Parameter Kualitas Air Sungai

Dalam melakukan pemantauan kualitas air sungai secara *real-time*, tidak semua parameter penilaian kualitas air sungai yang ada dalam regulasi dapat langsung dilakukan pengukuran di lokasi pengukuran (*in-situ measurement*). Hal tersebut dikarenakan kompleksitas pengujian parameter yang membutuhkan prosedur pengujian lebih lanjut di laboratorium. Sehingga, hanya beberapa parameter yang bisa dilakukan pengukuran secara langsung.

Pada penelitian yang telah dilakukan, sistem pemantauan kualitas air sungai di kota Bristol menggunakan parameter pengukuran yaitu nilai pH, DO, ORP, kekeruhan, konduktivitas, dan suhu air (Chen & Han, 2018). Dalam penelitian *real-time river water monitoring* yang berlokasi di sungai Ringarooma (kawasan *Ringarooma Cathcment*), parameter pengukuran pH, konduktivitas, suhu air, dan DO untuk mengetahui kualitas air sungai (Ellison et al., 2019). Pada penelitian lain, parameter yang umum digunakan dalam pemantauan kualitas air sungai secara *real-time* yaitu pH, oksigen terlarut (DO), ORP, suhu air, kekeruhan, konduktivitas, dan dalam beberapa penelitian lain juga menyertakan parameter lainnya seperti tinggi muka air, laju aliran air, suhu udara, kelembaban relatif (*relative humidity*), *presence of organic compounds*, konsentrasi klorin, dan klorofil (Geetha & Gouthami, 2016). Keberadaan kontaminan kimiawi dan biologis pada badan air dapat mempengaruhi parameter pemantauan seperti nilai pH yang tinggi (diatas 11) dapat menyebabkan iritasi pada kulit hingga selaput lendir, menurunnya nilai DO, hingga kenaikan nilai konduktivitas (merupakan indikator kemurnian air, semakin murni maka nilainya semakin rendah) (Geetha & Gouthami, 2016). Pada penelitian terkait *real-time water quality monitoring* yang dilakukan di Sungai Ganga, India, digunakan 16 parameter penilaian kualitas air yaitu BOD, COD, TOC, TSS, *benzene-toluene-xylene* (BTX), kekeruhan, warna, nitrat, pH, kalium, ammonia bebas, DO, suhu air, klorida (Cl^-), florida (F^-), konduktivitas (Singh et al., 2022).

3.5.3.2 Sensor

Sensor pengukuran kualitas air dapat menggunakan sensor yang sudah ada di pasaran maupun menggunakan sensor yang dikembangkan secara mandiri sesuai dengan kebutuhan pembacaan (Geetha & Gouthami, 2016). Sensor yang digunakan dapat berjenis *multi-parameter sensor* (dapat mengukur berbagai parameter dengan satu alat sensor)

dan *single parameter sensor* (satu alat sensor untuk pengukuran satu parameter). Terdapat beberapa pertimbangan yang digunakan dalam pemilihan sensor mulai dari ketersediaan sensor sesuai parameter yang ingin diperiksa, rentang pembacaan, hingga biaya. Detail terkait sensor pengukuran kualitas air sungai dapat dilihat pada lampiran dokumen ini.

3.6 SCADA Water and Wastewater Management System

Pada sub – bab ini akan dibahas terkait pedoman literatur arsitektur SCADA dan contoh penerapan SCADA pada Smart Water and Wastewater Management System

1.6.1 Arsitektur Smart Water and Wastewater Management System

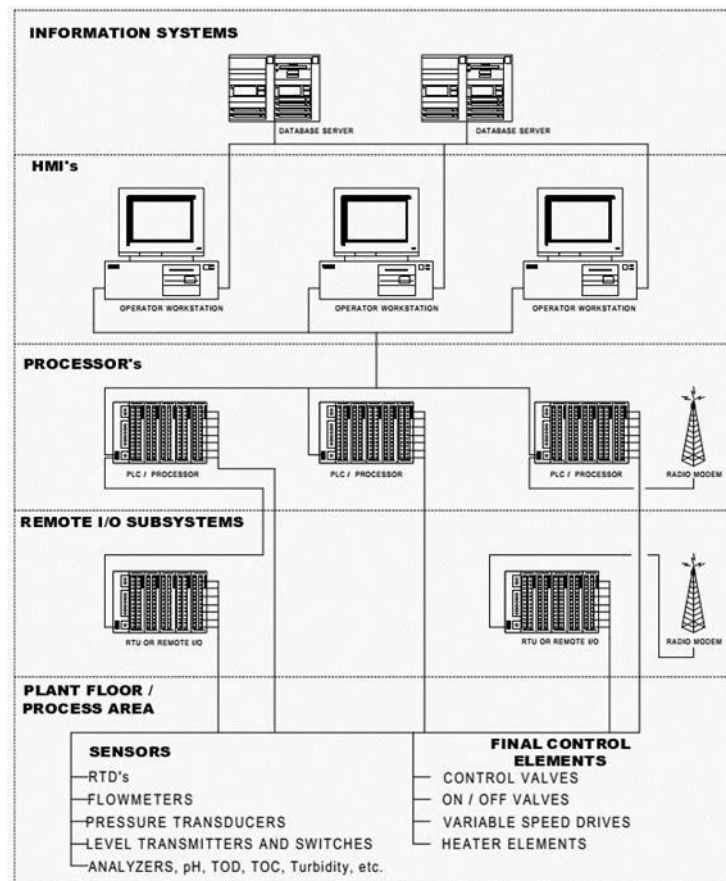
Teknologi SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) berawal dari era revolusi industri ketiga dan sejak tahun 1970 merupakan bagian dari pengenalan tentang monitoring, visualisasi dan kontrol operasional dalam berbagai industri. Sistem SCADA secara luas diimplementasikan pada proses manufaktur, proses pengolahan air dan sistem jaringan distribusi (gas, minyak bumi, dan perpipaan air). Dalam sistem SCADA yang diterapkan di Instalasi Pengolahan Air Minum (IPA) dan Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) terdiri dari fungsi kontrol sebagai berikut :

1. Bahan Kimia (dosis, penyimpanan dan persiapan)
2. Kebocoran (debit inlet dan outlet selama waktu pengoperasian baik dalam kapasitas penuh dan tidak penuh)
3. Efisiensi *Key Performance Indicators* (KPI)
4. Pengurangan limbah cair dan limbah padat
5. Monitoring real-time cuaca dan suhu
6. Pelaporan *real-time* neraca air
7. Mengoperasikan dalam keadaan optimum
8. Monitoring dan operasi untuk pengendalian otomatis di IPA dan IPAL

Secara umum manfaat dari sistem SCADA adalah kontrol dan monitoring utama dalam suatu instalasi ; efisien dalam penggunaan energi ketika dalam kondisi jam puncak operasional ; data yang tersajikan akurasi, real-time monitoring ; menaikkan kapasitas efisiensi dalam optimalisasi proses. Agar bisa menjalankan fungsinya secara maksimal, pada sistem SCADA juga terdapat berbagai arsitektur pendukung. Arsitektur SCADA disesuaikan dengan ukuran skala industri, proses, dan program yang harus diselesaikan.

Komponen arsitektur sistem SCADA tersajikan pada gambar 34 yang terdiri dari komponen:

1. *Human Machine Interface (HMI)*
2. *Radio Telemetry or Remote Terminal Units (RTU)-PLC*
3. *I/O Subsystems*
4. *Video Monitors*
5. *Field Sensors*
6. *Software pendukung lainnya*



Gambar 34. Arsitektur SCADA Bidang Pengelolaan Air

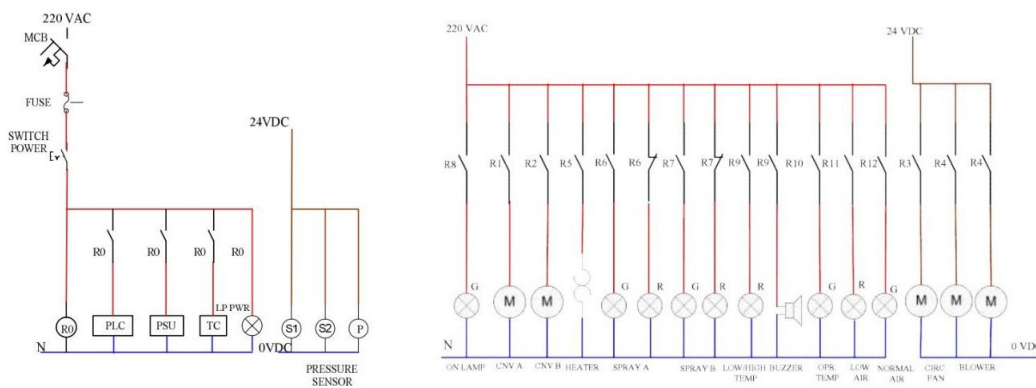
Sumber : <https://electrical-engineering-portal.com/download-center/books-and-guides/automation-control/scada-systems-in-wastewater-treatment>. Akses 20/10/2023

HMI adalah sebuah software pada computer berbasis grafis yang berfungsi untuk mempermudah pengawasan (*Supervisory*) kepada sang operator. HMI mengubah data-data dan angka kedalam bentuk grafik/trend, dan bentuk yang mudah diterjemahkan oleh sang operator.

HMI menampilkan data pada operator dan menyediakan input kontrol bagi operator dalam berbagai bentuk, termasuk grafik, skematik, dan lain sebagainya.

Programmable Logic Controller (PLC) adalah sebuah perangkat elektronik yang khusus dirancang untuk mengontrol suatu proses pada pengolahan air. Proses yang dikontrol dalam sistem PLC adalah berupa regulasi variabel secara kontinyu seperti pada sistem-sistem servo, algoritma untuk mengontrol unit pengolahan air melalui proses I/O digital (*Input/Output*) modul atau analog. Secara umum konsep dari PLC adalah sebagai berikut :

1. *Programmable* : menunjukkan kemampuan dari memori sistem PLC untuk menyimpan program dan fungsi yang bisa dioperasikan oleh operator.
2. *Logic* : kemampuan memproses masukan secara arimatika dan logika yaitu dengan melakukan sistem operasi agar error dalam sistem dapat diminimalisirkan.
3. *Controller* : menunjukkan mengontrol dan manajemen proses operasional.



Gambar 35. Ilustrasi Sistem Diagram Wiring PLC SCADA

Sumber : A. Setiawan et al., 2019

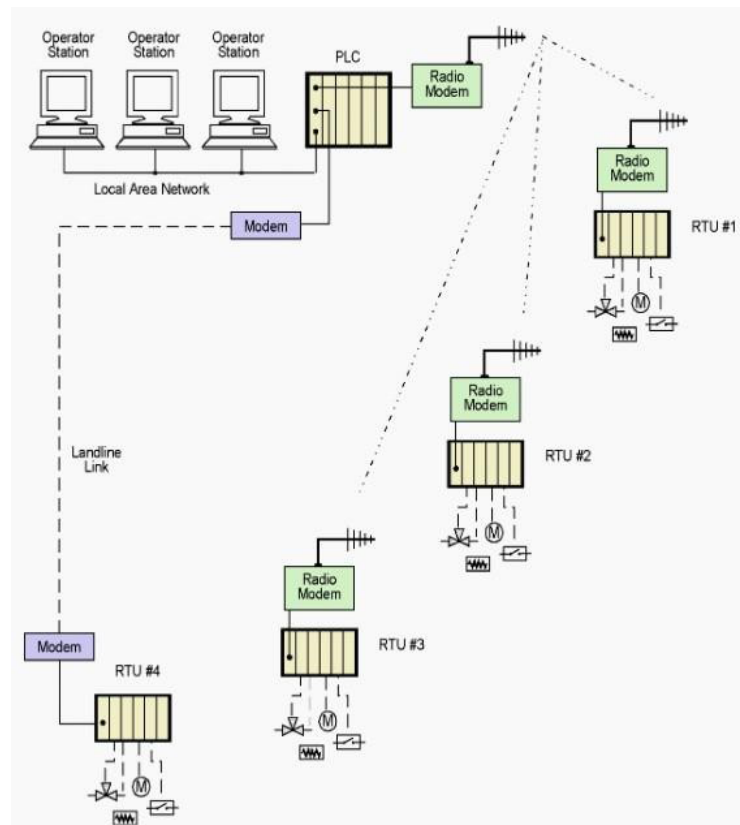
Komponen PLC SCADA pada gambar 35 diatas terdiri dari :

1. PLC (*Programmable Logic Controller*)
2. PSU (*Power Supply Unit*)
3. TC (*Thermocontrol*)
4. PSU (*Power Supply Unit*)
5. IL (*Indicator Lamp*)
6. S1 (*Count sensor 1*)
7. S2 (*Count Sensor 2*)
8. P (*Pressure Sensor*)
9. CNV (M) (*Motor Conveyor, Heater, Buzzer, Circulation Fan, Blower*)

Prinsip kerja dari PLC adalah sirkuit daya bekerja dengan mengaktifkan MCB ke posisi ON sehingga tegangan listrik masuk ke sirkuit melalui fuse. *Switch power* ke ON sehingga relay nol (R0) akan aktif dan kontak R0 berubah dari NO (Normally Open) ke NC (Normal Close) sehingga tegangan masuk dan mengaktifkan PLC (*Programmable*

Logic Controller), PSU (*Power Supply Unit*), TC (*Thermocontrol*), dan lampu indikator daya. Langkah untuk mematikan sirkuit dengan memutar pemutus daya ke OFF dan menonaktifkan MCB ke OFF sehingga semua peralatan kembali ke OFF.

Remote Terminal Unit (RTU) adalah unit pendukung arsitektur SCADA untuk mengirimkan sinyal kontrol data dari *field sensors* atau sensor lapangan dan *subsystem* dari *I/O remote* ke PLC. Kecepatan pengiriman data antara RTU dan alat yang dikontrol relatif tinggi dan kode kontrol yang digunakan umumnya *close loop*.



Gambar 36. Remote Terminal Unit (RTU) Systems

Sumber : <https://electrical-engineering-portal.com/scada-dcs-plc-rtu-smart-instrument>. Akses 25/10/2023

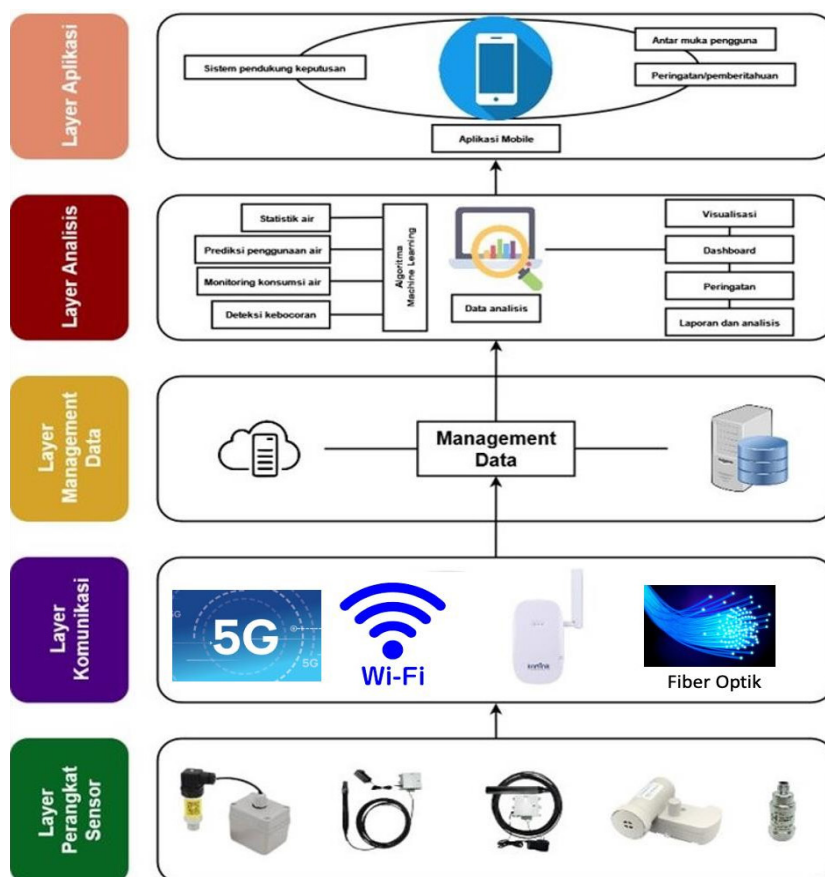
Field Sensors terdiri objek yang memiliki berbagai sensor dan aktuator. Nilai sensor dan aktuator inilah yang umumnya diawasi dan dikendalikan supaya objek/plant berjalan sesuai dengan keinginan yang dikehendaki oleh pengguna.

3.6.2 Arsitektur Komunikasi SCADA

Arsitektur komunikasi SCADA terdiri dari 5 (lima) buah *layer*, seperti terlihat pada Gambar 37.

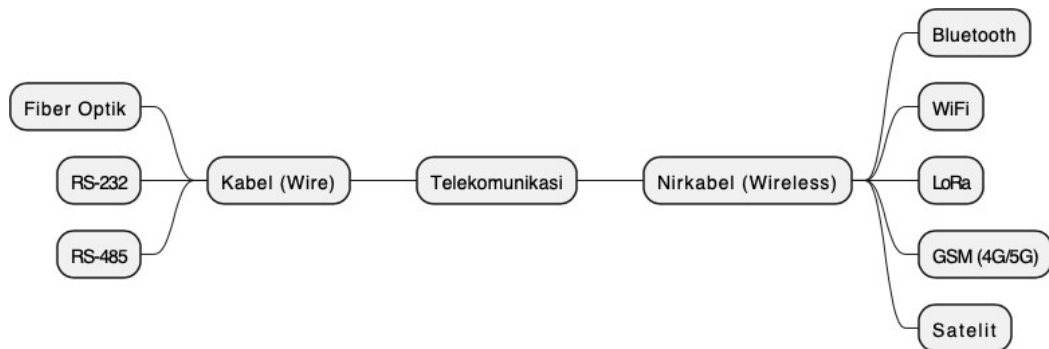
Berikut penjelasan dari setiap layer komunikasi SCADA tersebut:

1. Layer pertama terdiri dari perangkat, seperti sensor dan aktuator, yang digunakan untuk menangkap informasi dan data yang dibutuhkan secara realtime dan berkala, data yang diakuisisi dan dimonitoring untuk dikirim, kepusat data melalui layer komunikasi.
2. Layer kedua merupakan layer komunikasi yang berfungsi untuk mengirimkan data dari sensor dan aktuator ke lapisan manajemen data dengan tujuan mempermudah mobilitas sistem dalam mengirim data kepusat data. Layer komunikasi ini dapat berupa kabel (*wire*), seperti fiber optik dan RS485, maupun nirkabel (*wireless*), seperti Bluetooth, WiFi, LoraWAN, dan 5G.
3. Layer data manajemen berfungsi untuk menyimpan dan mengelola data volume besar yang dikumpulkan dari sensor dan aktuator. Selain itu, layer ini berfungsi sebagai titik standardisasi sehingga data akan distandarisasi dengan domain data.
4. Layer analisis menyediakan fungsi data analisis, seperti statistik air, prediksi penggunaan air, dan deteksi kebocoran. Analisis dapat menggunakan algoritma yang sesuai, seperti algoritma *Machine Learning* dan *Artificial Intelligences*.
5. Layer Aplikasi berfungsi untuk visualisasi hasil analisis berupa dashboard yang dapat berisi informasi statistik air. Layer ini juga mendukung sistem keputusan cerdas, peringatan dini, serta laporan.



Gambar 37. *Layer* Arsitektur komunikasi SCADA

Pengaturan telekomunikasi pada setiap sensor dan aktuator pada SCADA terdiri dari dapat dilihat pada Gambar 38. Secara umum, terdapat 2 (dua) jenis telekomunikasi, yaitu telekomunikasi kabel (*wire*) dan nirkabel (*wireless*).



Gambar 38. Arsitektur komunikasi SCADA

Penggunaan komunikasi kabel menjadi solusi saat jangkauan telekomunikasi nirkabel sulit diperoleh atau ketika jarak yang diperlukan tidak terlalu jauh, berkisar antara 100 meter hingga 1 kilometer. Dalam kasus jarak yang lebih pendek, kabel RS-232 mampu mengatasi kebutuhan tersebut dengan baik, sementara kabel RS-485 dapat menjangkau jarak yang sedikit lebih jauh dengan stabilitas transmisi yang handal.

Namun demikian, komunikasi nirkabel tetap memegang peran penting dalam beberapa konteks. Pada sistem SCADA, misalnya, komunikasi nirkabel sangat dibutuhkan untuk menghubungkan sensor dan aktuator dalam lingkup yang lebih luas. Ini memungkinkan pengumpulan data secara real-time serta pengendalian sistem secara efisien, terutama di area yang sulit dijangkau oleh koneksi kabel, seperti menggunakan GSM (4G/5G) dan Satelit.

Selain itu, untuk komunikasi nirkabel antar sensor dan aktuator, biasanya menggunakan Bluetooth, WiFi, maupun LoRa. Bluetooth memiliki cakupan yang terbatas, biasanya sekitar 10 meter hingga 100 meter, dengan kecepatan transfer data yang bervariasi tergantung pada versinya, cocok untuk perangkat-perangkat seperti headset nirkabel dan aksesoris dengan konsumsi daya rendah. Wi-Fi memiliki cakupan yang lebih luas, biasanya mencakup beberapa puluh hingga ratusan meter, dengan kecepatan transfer data tinggi, cocok digunakan di lingkungan lokal. LoRa didesain untuk cakupan yang sangat luas, bahkan mencapai beberapa kilometer hingga puluhan kilometer dengan kecepatan transfer data yang lebih rendah, namun memiliki konsumsi daya yang sangat rendah.

Kombinasi antara komunikasi kabel dan nirkabel memungkinkan integrasi yang lebih luas dan efektif dalam infrastruktur sensor dan aktuator SCADA. Penggunaan kabel memberikan kestabilan dan keamanan transmisi data pada jarak tertentu, sementara komunikasi nirkabel memungkinkan fleksibilitas dan konektivitas di area yang sulit dijangkau oleh kabel konvensional. Kedua sistem ini saling melengkapi untuk memenuhi kebutuhan telekomunikasi SCADA modern yang terus berkembang.

3.6.3 Contoh Penerapan Smart Water and Wastewater Management System

3.6.3.1 SCADA dalam Water Management

Penggunaan sistem SCADA sebagai dasar pemantauan merupakan hal yang cukup sering ditemui terutama pada instalasi pengolahan air (IPA). Penggunaan SCADA ini dapat digunakan di berbagai aplikasi, seperti pada unit filtrasi, stasiun pompa, jaringan distribusi, keamanan instalasi, dan perawatan data. Pada unit filtrasi, SCADA memungkinkan user dapat memantau kondisi lingkungan, intensitas UV, level tangki, dan level bahan kimia. Selain itu, Degnan menggunakan SCADA user tidak perlu melakukan pengecekan secara langsung apabila terjadi permasalahan serta penyesuaian operasional juga dapat dilakukan melalui relay kontrol dengan mengklik tombol. Pada stasiun pompa, penggunaan SCADA dapat mengefisienkan jumlah pegawai di lokasi stasiun pompa dengan cara melakukan pemantauan di satu lokasi monitoring. Pompa-pompa tersebut kemudian dapat di kontrol melalui jaringan untuk memberikan informasi pemeliharaan yang tepat. Dengan SCADA, pemantauan jaringan distribusi akan menjadi lebih mudah karena pembacaan volume dan tekanan yang diperoleh secara terus menerus dari berbagai area di dalam jaringan akan ditampilkan secara keseluruhan di satu sistem. Pada keamanan instalasi, SCADA dapat digunakan seperti pemantauan aktivitas mencurigakan dengan memantau sensor gerak, kamera video, dan alarm pintu yang kemudian dapat dipantau oleh user melalui ruang monitoring. Dengan menggunakan SCADA, data operasional, aset, dan peralatan semuanya dikirim melalui satu sistem SCADA sehingga dapat mengurangi jumlah tugas yang perlu diselesaikan oleh karyawan sekaligus menunjukkan kepatuhan terhadap peraturan (Dominic O'Donnell, 2022).

Pada pengolahan air di IPA, penggunaan SCADA dapat digunakan sebagai pengatur dosis zat kimia yang akan diinjeksikan ke air selama proses pengolahan air. Contoh dari pengaturan dosis yaitu terjadi pada proses koagulasi. Pada proses ini, sensor membaca

bahwa air yang diproses memiliki kualitas yang bervariasi terus menerus secara acak sehingga dengan menggunakan sistem SCADA, dosis koagulan yang ditambahkan secara otomatis dapat disesuaikan dengan kebutuhan berdasarkan hasil pembacaan sensor kualitas air seperti pH dan kekeruhan. Dari data kekeruhan dan pH yang terbaca, sistem SCADA dapat memerintahkan lama waktu menghidup/matikan pompa dosing serta mengatur kecepatan putaran bilah pengaduk. Selain dosing zat kimia, SCADA juga mampu digunakan untuk mengontrol proses filtrasi dan backwash. Untuk proses penyaringan melalui saringan pasir cepat, pengoperasian katup adalah parameter utama yang dikontrol oleh sistem SCADA untuk mengatur laju aliran di seluruh tempat tidur filter. Jika perbedaan tekanan yang diukur di sepanjang unggun filter meningkatkan nilai pengenal maka sistem SCADA menghentikan proses penyaringan dan memulai backwash filter. Proses backfilter membutuhkan kontrol yang lebih kompleks. Awal pencucian ditentukan oleh sistem oleh kondisi itu yang mengatur proses tersebut. Untuk proses backfilter, katup filter biasa harus ditutup dan katup pembuangan ditutup dibuka. Kemudian pengoperasian blower udara yang tepat waktu dan katup air pencucian balik adalah operasi utama dari pencucian balik yang paling baik ditangani oleh sistem SCADA daripada operasi manual. Penggunaan sistem SCADA untuk jenis ini operasi ini lebih menguntungkan daripada operasi WTP konvensional. Pengoperasian katup yang berat dan besar dikendalikan oleh aktuator listrik dengan sangat lancar dan tepat. Juga sinyal umpan balik dari posisi katup memberikan pengoperasian sistem yang sangat mudah. Akhirnya dosis klorin dilakukan untuk memasukkan sisa klorin ke dalam air untuk desinfeksi di sepanjang distribusi jaringan. Jumlah sisa klorin yang harus disimpan dalam air dihitung oleh sistem SCADA dan karenanya dosis ditentukan dalam air yang dimurnikan. Kemudian pompa air murni akhir digunakan untuk mengirimkan air murni di sepanjang lokasi yang diinginkan. (Sunil L. Andhare, 2014).

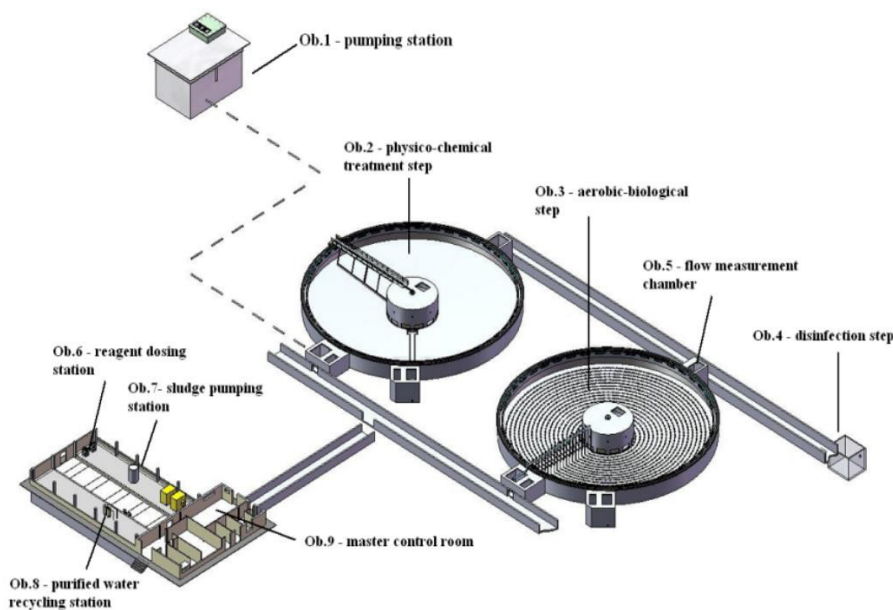
3.6.3.2 SCADA dalam *Wastewater Management*

Penggunaan SCADA dalam IPAL bertujuan untuk mempermudah operasional dan efisiensi operasi unit tersebut. Sistem SCADA dikoneksikan dengan unit penginderaan jauh maupun lokal dan dihubungkan dengan unit pemantauan terpusat untuk kemudian dilakukan tindak lanjut pengambilan keputusan atas data yang ada. Pengaplikasian SCADA pada IPAL pada umumnya adalah sebagai berikut (Humoreanu & Nascu, 2012):

1. Penyediaan data untuk permodelan dan optimasi penggunaan energi
2. Penyediaan deteksi dini permasalahan melalui *diagnostic displays*, sehingga memungkinkan intervensi segera melalui *fast resolutions*

3. Sistem prediksi aliran air limbah untuk *seasonal flow* dan musim basah (*wet weather*)
4. Mereduksi penggunaan energi dan biaya yang berkaitan dengan proses aerasi pada unit pengolahan biologis
5. Memperbaiki karakteristik pengendapan biomasa
6. *Overview screen* untuk menunjukkan kondisi keseluruhan dari sistem
7. *Alarm summary screen* untuk menunjukkan semua sistem peringatan
8. *Alarm history screen* dengan tanggal mulai dan berakhir yang dapat dipilih
9. *Trend screen* untuk setiap sensor parameter proses yang menunjukkan pemantauan *real-time* dan data historis dengan *timeline*
10. *Report package*

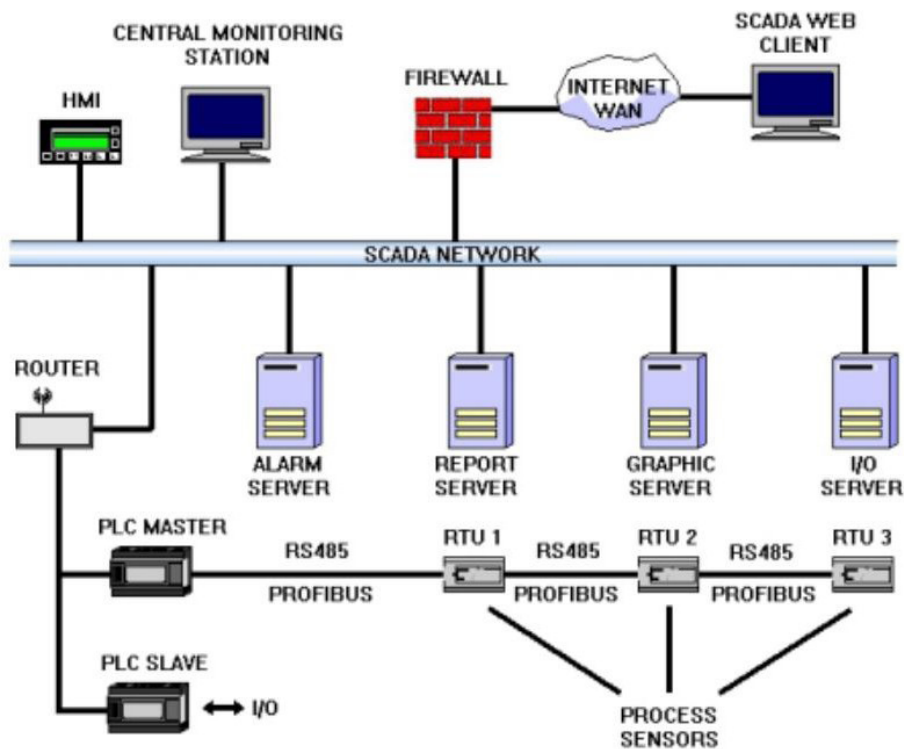
Dalam penelitian yang dilakukan di Rumania, implementasi SCADA dilakukan untuk mengoptimasi pemantauan dan pengendalian IPAL (Humoreanu & Nascu, 2012). Terdapat enam unit pengolahan dalam IPAL tersebut yaitu *preliminary treatment/screening*, sedimentasi primer, pengolahan biologis (lumpur aktif), disinfeksi, dan pengolahan lumpur.



Gambar 39. Unit Instalasi Pengolahan Limbah di Rumania

Sumber: (Humoreanu & Nascu, 2012)

Sistem komunikasi SCADA menggunakan PROFIBUS dengan konektor RS485 dan protokol TCP/IP melalui jaringan *fiber optic*. Penggunaan jaringan komunikasi data melalui LAN bertujuan untuk menjaga keamanan data dibandingkan menggunakan jaringan internet.



Gambar 40. Arsitektur SCADA pada IPAL di Rumania

Sumber: (Humoreanu & Nascu, 2012)

Perangkat PLC dan RTU menginterpretasikan informasi dari sensor yang telah terhubung dan mentransmisikannya ke SCADA *master*. Kemudian, perangkat PLC dan RTU menerima perintah dari SCADA *master* dan mengirimkan informasi perintah tersebut ke *control devices* terkait. Proses tersebut memungkinkan SCADA *master* mengendalikan proses-proses spesifik dari satu lokasi terpusat.

Terdapat enam komponen dalam sistem SCADA yang diimplementasikan pada IPAL tersebut, yaitu HMI, CMS, RTU, PLC, CI, dan FI (Humoreanu & Nascu, 2012). *Human-Machine Interface* (HMI) merupakan komponen yang menghubungkan antara operator dengan sistem SCADA menggunakan *browser interface* yang memungkinkan operator sistem untuk mengambil tindakan berdasarkan data yang diperoleh dari seluruh jaringan sistem SCADA. *Central Monitoring System* (CMS) adalah *master unit* dari sistem SCADA yang bertugas untuk memperoleh informasi yang telah dikumpulkan oleh *remote stations* dan menghasilkan tindak lanjut atas setiap peristiwa yang terdeteksi. Dengan konfigurasi *single computer*, CMS dapat berbagi informasi dari sistem SCADA. *Remote Terminal Units* (RTU) merupakan unit pengumpul data otomatis dan menghubungkannya secara langsung ke sensor proses. Perangkat RTU memantau parameter digital dan analog lalu

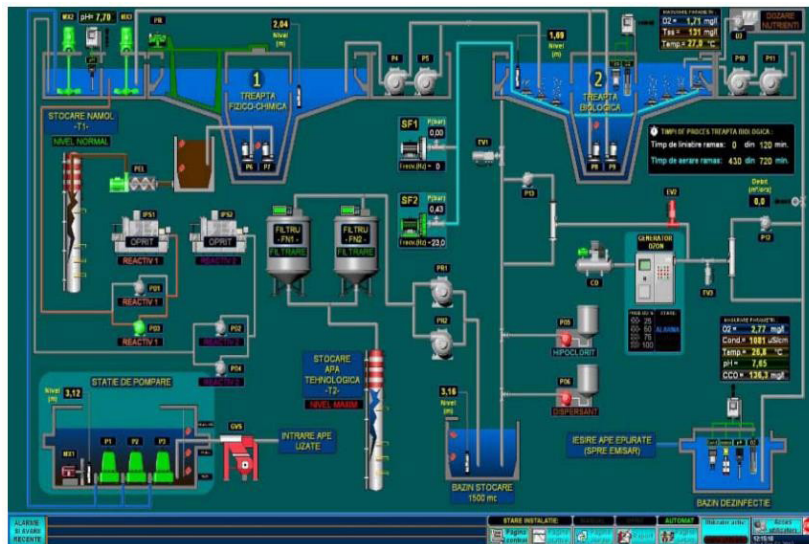
mentransmisikan seluruh data tersebut ke CMS, perangkat RTU juga berfungsi sebagai *slave units* bagi SCADA *master* (pengontrol pengawasan) dan dalam IPAL di Rumania digunakan RTU dengan *multi-parameter controller* yang didesain dapat berfungsi dengan *digital probe* apapun. *Programmable Logic Controller* (PLC) digunakan sebagai perangkat otomasi dalam proses IPAL dan didesain untuk berbagai konfigurasi *input* dan *output*, rentang suhu yang besar, ketahanan terhadap *electrical noise*, dan tahan getaran serta benturan. *Communication Infrastructure* (CI) berfungsi sebagai penghubung antara RTU dan PLC ke sistem pemantauan. Perangkat *Field Instrumentation* (FI) merupakan perangkat yang tersambung dengan mesin atau peralatan yang dikendalikan dan dipantau melalui sistem SCADA, yaitu sensor pemantauan parameter serta aktuator untuk mengendalikan modul tertentu dari sistem.

Dalam sistem SCADA di IPAL tersebut, pemantauan dibagi menjadi tiga jenis (*on-line monitoring*, *remote monitoring*, dan *local monitoring*) berdasarkan tujuan pemasangan sensor dan bentuk upaya tindak lanjut yang dapat dilakukan (Humoreanu & Nascu, 2012). Dalam pemantauan *on-line monitoring*, digunakan sensor pemantauan *real-time* yang disambungkan dengan sistem SCADA sehingga dapat dilakukan pemantauan berbagai jenis parameter dalam IPAL secara jarak jauh. Hal tersebut memungkinkan adanya *early warning system* terhadap kondisi operasional IPAL seperti kegagalan/gangguan pada peralatan atau gangguan pada proses yang ada maupun yang akan datang (Humoreanu & Nascu, 2012). Visualisasi data dari *on-line monitoring* dapat diakses melalui *Graph menu* pada SCADA *application screen* yang dapat menyajikan data dalam bentuk kurva dan grafik dalam rentang waktu tertentu.

Terdapat empat parameter dalam *on-line monitoring* yaitu pH, TSS, DO, dan COD (Humoreanu & Nascu, 2012). Parameter pH dipantau untuk menjaga dan mengendalikan nilai pH agar tetap stabil utamanya pada inlet IPAL, sehingga dapat dilakukan intervensi untuk menjaga nilai pH agar tetap sesuai melalui injeksi senyawa asam atau basa sesuai dengan kondisi influen. Pemantauan parameter TSS dilakukan dengan mengukur gabungan padatan yang dapat diendapkan dan tidak dapat diendapkan dalam IPAL. Peningkatan nilai TSS berdampak pada penurunan kemampuan badan air untuk menunjang kehidupan dalam air karena peningkatan suhu air akibat serapan panas matahari oleh padatan yang kemudian berdampak pada penurunan DO (Humoreanu & Nascu, 2012). Pemantauan parameter DO menjadi poin penting untuk menjaga operasional unit pengolahan biologi dan dapat digunakan untuk pengendalian otomatis proses aerasi berdasarkan konsentrasi DO dalam air yang diolah sehingga dapat meningkatkan efisiensi penggunaan energi pada IPAL. Hal

tersebut dapat diidentifikasi dari nilai *oxygen demand* (Kebutuhan oksigen untuk menjaga berlangsungnya proses pengolahan biologis) yang diinterpretasikan melalui nilai *organic* dan *ammonia loading* dari influen air limbah (Humoreanu & Nascu, 2012). Nilai *oxygen demand* mengikuti pola diurnal, yaitu rendah pada malam hari dan meningkat pada pagi serta sore hari. Pengendalian DO otomatis dilakukan dengan mengatur kecepatan *blower* dalam mengalirkan udara ke dalam unit pengolahan biologis agar mencapai nilai target nilai DO (Humoreanu & Nascu, 2012). Parameter COD dipantau untuk mengetahui *biodegradability*, sehingga dapat diidentifikasi apakah influen dapat diolah secara biologis atau membutuhkan intervensi/pengkondisian terlebih dahulu.

Dalam hal *remote monitoring*, tujuan pemantauan tersebut adalah agar memungkinkan data diakses melalui *remote web access* sehingga operator dapat memantau kondisi peralatan secara jarak jauh hingga mengumpulkan data produksi/operasional IPAL. Selain itu, petugas perawatan unit juga dapat melakukan diagnosa atas kondisi peralatan dan melakukan perbaikan atas permasalahan. Pemantauan lokal (*Local Monitoring*) bertujuan untuk menyajikan diagram IPAL secara keseluruhan yang ditampilkan dalam SCADA *server* sehingga dapat dilakukan identifikasi langsung mengingat diagram IPAL yang disajikan merepresentasikan sistem IPAL secara aktual.



Gambar 41. Diagram Aktual IPAL pada Sistem SCADA dalam *Local Monitoring*

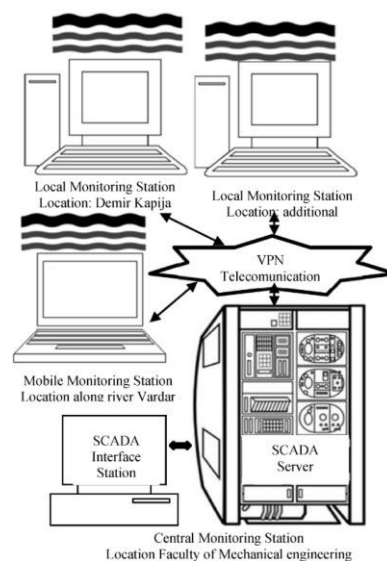
Sumber: (Humoreanu & Nascu, 2012)

Terdapat delapan unit yang dapat dipantau dan dikendalikan melalui *local monitoring* yaitu *entrance well* (memantau status *mixer*, nilai pH, suhu, dan mengendalikan *mixer*), sedimentasi primer (memantau dan mengendalikan pompa transfer serta *water level*

sensor), pengolahan biologis (memantau *discharge pump* dan *blower*, *flow rate*, *water level sensor*, suhu, DO, dan TSS, serta mengendalikan *discharge pump* dan *blower*), pengolahan lumpur (memantau status dan mengendalikan pompa lumpur dan *sludge level* dari *storage tank*), *dosing station* (mengendalikan koagulasi dan flokulasi), *ozone generator* (memantau status *ozone generator* dan mengendalikan produksi ozon dari 0-100 g/jam), *pumping station* (memantau dan mengendalikan pompa, memantau *water level sensor*), *outlet well* (memantau DO, pH, konduktivitas, COD, dan suhu)

3.6.3.3 SCADA dalam *River Water Pollution Monitoring*

Implementasi SCADA dalam pemantauan kualitas air permukaan telah diterapkan untuk memungkinkan pemantauan secara *real-time* yang memungkinkan untuk dapat dilakukan upaya tindak lanjut secara segera. Dalam penelitian yang dilakukan di sungai Vardar, Makedonia, digunakan sistem SCADA untuk memantau kualitas sungai dengan mengukur dan mengevaluasi parameter fisik, kimia, biologis, dan hidrolis dari air sungai (Zaev et al., 2016). Dalam penelitian tersebut, sistem SCADA terdiri atas *Central Monitoring Station (CMS)*, *Local Monitoring Station (LMS)*, dan *Mobile Monitoring Station (MMS)*.



Gambar 42. Struktur *Real-Time Platform* Implementasi SCADA pada Pemantauan Sungai Vardar, Makedonia

Unit CMS, yang terdiri atas *server SCADA* dan *PC based interface/service station*, berfungsi sebagai pusat koordinasi, pemantauan, dan *real-time SCADA platform* (Zaev et al., 2016). Seluruh data pengukuran, analisis, sinyal, *working status*, peringatan, dan informasi kondisi umum ditransmisikan dari LMS dan MMS di seluruh wilayah ke

unit CMS. Data yang diterima kemudian diproses oleh *software* SCADA lalu kemudian disimpan pada *data storage hardware* dalam bentuk *file* per hari. Akses terhadap hasil pengolahan data oleh *software* SCADA hanya bisa dilakukan dengan tiga cara yaitu akses langsung ke *server*, akses menggunakan *local appropriate network (Ethernet)*, dan akses melalui *internet interface*. Akses tersebut hanya bisa dilakukan oleh *authorized user* yang nantinya dapat mengakses data untuk kebutuhan observasi kondisi sungai berdasarkan data paling baru, untuk mengetahui kondisi sungai dalam rentang waktu tertentu yang disajikan dalam bentuk grafik, atau dapat pula melakukan perbandingan antar stasiun pemantauan (Zaev et al., 2016).

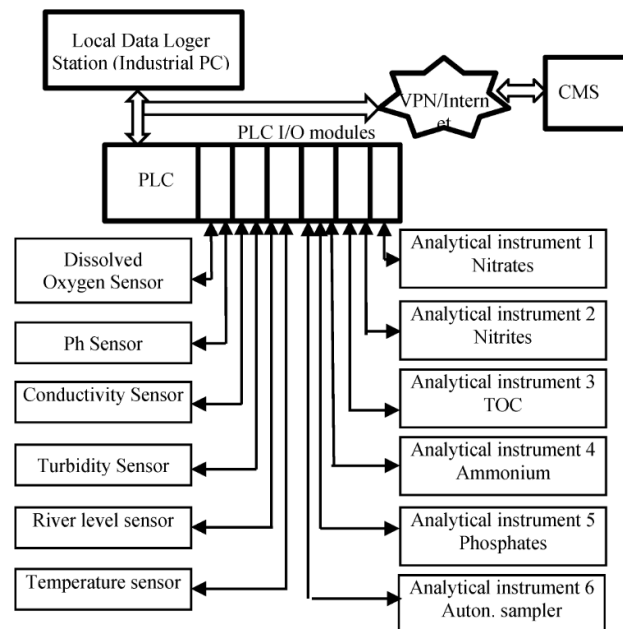
Unit LMS berfungsi sebagai stasiun pemantauan tetap, dalam penelitian ini ditempatkan dekat kota Demir Kapija, Makedonia. Unit tersebut terbagi atas dua jenis yaitu unit pengukuran dan unit otomasi. Unit pengukuran terdiri atas tiga jenis instrumen, yaitu:

1. Sensor pengukuran *real-time (online)* yang ditenamkan dalam sungai (mengukur parameter DO, konduktivitas, pH, kekeruhan, reduksi oksidasi, suhu air, ammonia, dan kalium)
2. Sensor pengukuran *real-time (online)* yang dipasang pada LMS (mengukur tekanan hidrostatik sungai, tinggi muka air, DO, pH, konduktivitas, dan suhu)
3. Instrumen analisa data (*online*) dipasang pada LMS (mengukur nitrat, nitrit, fosfat, TOC, kekeruhan, dan toksisitas)



Gambar 43. Unit LMS yang Dibenamkan dalam Sungai

Seluruh sensor dan perangkat pada LMS dioperasikan serta dikendalikan menggunakan sistem otomasi berbasis PLC. Sistem tersebut menerima data dari seluruh perangkat yang tersambung dan melakukan diagnosa atas data yang diterima, diproses, dikodifikasi, dan ditransmisikan ke unit CMS menggunakan modul telekomunikasi.



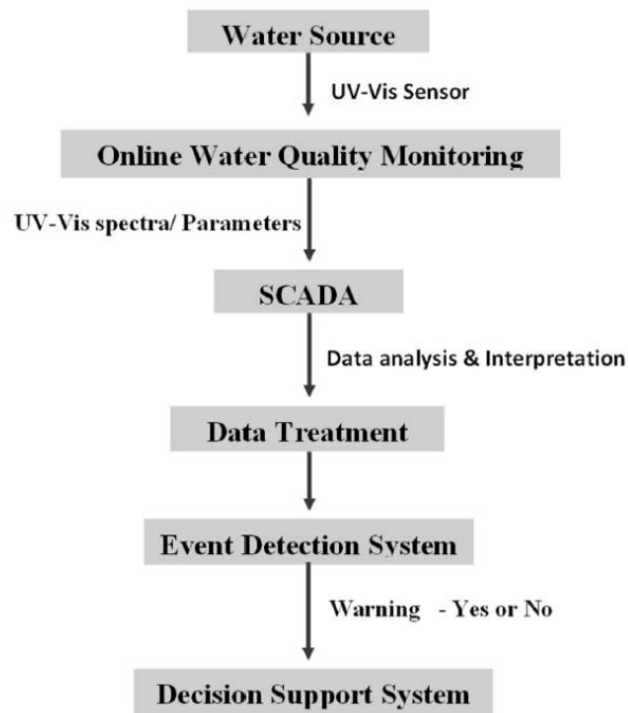
Gambar 44. Interkoneksi Struktur Sistem Otomasi Berbasis PLC dengan Seluruh Instrumen dan Perangkat Sensor

Sumber: (Zaev et al., 2016)

3.6.4 Aplikasi Pendukung *Smart Water and Wastewater Management*

3.6.4.1 *Early Warning System* Kualitas Air Minum

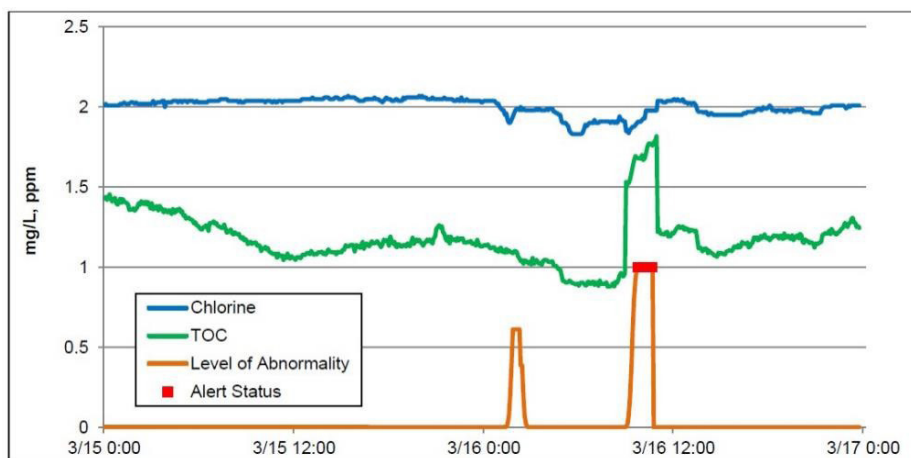
Saat ini, banyak perusahaan air minum memanfaatkan titik setup point untuk mengatur alarm pada monitoring kualitas air minum secara *real-time*, dimana dapat diidentifikasi dari alarm kapan parameter kualitas air berada diluar kisaran nilai yang sesuai dengan standard yang ditetapkan. *Event Detection System* (EDS) adalah *tools* yang digunakan untuk menganalisis data secara real-time, menghasilkan peringatan ketika kualitas air dianggap tidak normal. Algoritma yang digunakan EDS bervariasi dalam kompleksitas, dengan nilai alarm yang didefinisikan dalam sistem kontrol SCADA (Sean A. McKenna, David B. Hart, Katherine Klise, Mark Koch, Eric D. Vugrin, Shawn Martin, Mark Wilson, Victoria Cruz, Laura Cutler 2010).



Gambar 45. Flowchart Event Detection System (EDS)

Output yang dihasilkan dari sistem EDS adalah sebagai berikut :

1. *Alert status* : indikator normal/abnormal untuk kualitas air. Ini mengidentifikasi persis kapan EDS memperingatkan melalui sistem yang terhubung ke SCADA.
2. *Alert level* : batas nilai yang sudah di *set* dalam sistem SCADA, terdeteksi nilai yang lebih tinggi menunjukkan kepastian yang lebih besar bahwa anomali kualitas air terjadi dari *alert status*.
3. *Trigger parameter(s)*: Parameter kualitas air dari sensor yang terpasang dan diintegrasikan ke sistem SCADA.



Gambar 46. Ilustrasi Kurva Event Detection System (EDS)

3.6.4.2 Sistem Penagihan dan Pembayaran

Saat ini, sistem penagihan dan pembayaran air yang diterapkan oleh PDAM terbagia atas dua metode, yaitu konvensional (manual) dan digital atau online. Penagihan secara konvensional dinilai kurang efektif karena bergantung pada kepatuhan pelanggan untuk membayar atau terkadang resiko kesalahan cukup tinggi. Oleh karena itu, penagihan secara digital lebih diutamakan. Dalam penggunaan penagihan secara digital, terdapat dua cara yang digunakan oleh PDAM, cara pertama adalah dengan melakukan kerja sama dengan mitra PPOB (*Payment Point Online Bank*) agar mempermudah pelanggan untuk membayar tagihan dari berbagai platform online, seperti e-commerce dan mobile banking. Penerapan metode ini adalah dengan menggunakan *integrated billing system* yang berguna untuk mengintegrasikan berbagai macam metode pembayaran secara online. Cara kedua adalah dengan menggunakan aplikasi mobile untuk melakukan penagihan ke rumah-rumah pelanggan. Aplikasi ini membantu petugas untuk mencatat tagihan dengan lebih akurat serta terintegrasi dengan database pelanggan.



Gambar 47. Ilustrasi Sistem Pembayaran *Integrated Billing*

Contoh dari aplikasi *mobile* yang telah dikembangkan adalah aplikasi khusus terkait PDAM seperti pada Gambar 48. Pada saat ini, terdapat sekitar 67 perusahaan PDAM yang telah menerapkan teknologi aplikasi *mobile* untuk menghubungkan pelanggan dengan pihak PDAM. Aplikasi yang digunakan tersebut saat ini memiliki fitur-fitur seperti melakukan pembayaran tagihan air, mengetahui info pemakaian air, pembacaan meteran air mandiri (pelanggan dapat melaporkan penggunaan air secara mandiri dengan cara memfoto meteran air lalu mengirimkannya ke aplikasi). Selain fitur tersebut, di aplikasi ini juga dapat dilakukan pengajuan permintaan pemasangan sambungan baru serta layanan pengaduan dengan terhubung langsung dengan pihak PDAM melalui modul yang dapat

menghubungkan laporan di aplikasi pelanggan ke sistem PDAM. Saat ini aplikasi ini dapat diinstal smartphone terutama dengan sistem operasi android dan tersedia di playstore.



Gambar 48. Contoh Tampilan Utama Aplikasi *Mobile*

3.6.4.3 Permohonan Koneksi Baru dan Pengaduan Keluhan

Sama halnya dengan sistem penagihan dan pembayaran, permohonan koneksi baru dan pengaduan keluhan dapat dilakukan melalui aplikasi *mobile*. Sistem pengaduan bekerja dengan menghubungkan laporan pengaduan dan permintaan terkait sambungan melalui aplikasi mobile ke sistem server petugas PDAM. Permohonan yang telah dibuat oleh pelanggan melalui aplikasi kemudian akan terhubung dengan sistem petugas PDAM. Sistem tersebut kemudian akan memiliki peran yang signifikan sebagai bagian dari tindak lanjut segala permohonan yang masuk aplikasi pelanggan sehingga segala proses kerja yang ada di PDAM dapat berjalan sebagaimana mestinya. Sistem ini mampu, mengelola segala aspek yang berhubungan dengan SPK (Surat Perintah Kerja) yang sebelumnya sudah diproses dari aplikasi pelanggan. Dengan adanya modul ini, maka dapat membantu para stakeholder terkait dalam memantau dan mengontrol segala proses kerja utama yang terjadi di PDAM seperti memantau seberapa jauh proses kerja yang sudah berjalan, semua dilakukan dalam satu aplikasi yang telah terhubung dan terintegrasi.

BAB IV

REKOMENDASI

4.1 Instalasi Pengolahan Air

4.1.1 Kriteria perencanaan

Dalam perencanaan pemantauan kualitas air, terdapat 2 regulasi yang dapat menjadi rujukan yaitu i) Peraturan Menteri Kesehatan (Permenkes) No 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan dan ii) Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (Permenpu) nomor 26 tahun 2014 tentang Prosedur Operasional Standar Pengelolaan Sistem Penyediaan Air Minum.

Merujuk pada Permenkes 2/2023, disebutkan adanya pemantauan operasional rutin harian dan pemantauan berkala. Untuk pemantauan operasional rutin harian parameter kekeruhan, pH, residu klorin perlu dipantau di daerah tangkapan (intake pada sumber air baku), infrastruktur transmisi, instalasi pengolahan (IPA/WTP), reservoir dan sistem distribusi. Kekeruhan, pH, dan residu klorin merupakan parameter kualitas air yang sering dipantau dan saat ini sudah tersedia alat pengukuran dalam bentuk smart sensor. Lebih lanjut, Permenkes 2/2023 juga mewajibkan pemantauan berkala air produksi dengan ketentuan parameter mikrobiologis (sejumlah 2 parameter), dan parameter fisik (sejumlah 5 parameter) dilakukan minimal setiap bulan, sedangkan untuk parameter kimia (sejumlah 12 parameter) dilakukan minimal setiap 6 bulan. Apabila digunakan smart sensor, pemantauan akan dilakukan dengan frekuensi lebih tinggi mengingat tipikal measurement time dari smart sensor berkisar pada order beberapa detik sampai menit. Sehingga aplikasi smart sensor tentu akan memenuhi kriteria pemantauan operasional dan berkala pada Permenkes 2/2023.

Pada Permenkes 2/2023 juga disebutkan mengenai “peralatan uji cepat di lapangan”. Istilah dapat dimaknai salah satunya sebagai penggunaan smart sensor. Disebutkan juga bahwa uji cepat ini dapat digunakan untuk deteksi dini/pemeriksaan awal yang dapat dikombinasikan dengan pemeriksaan lanjutan ke laboratorium terakreditasi dan teregistrasi di Kementerian Kesehatan atau laboratorium yang ditunjuk oleh pemerintah daerah. Pada konteks ini, dapat dimaknai bahwa penggunaan sensor tidak harus memenuhi limit deteksi air produksi, karena juga dapat berperan sebagai alat deteksi dini saja. Informasi ini tentu sangat penting dan memberikan lampu hijau untuk implementasi smart sensor walaupun limit deteksinya belum memenuhi syarat kualitas air minum, selama implementasinya sebagai alat deteksi dini dan dikombinasikan dengan uji laboratorium.

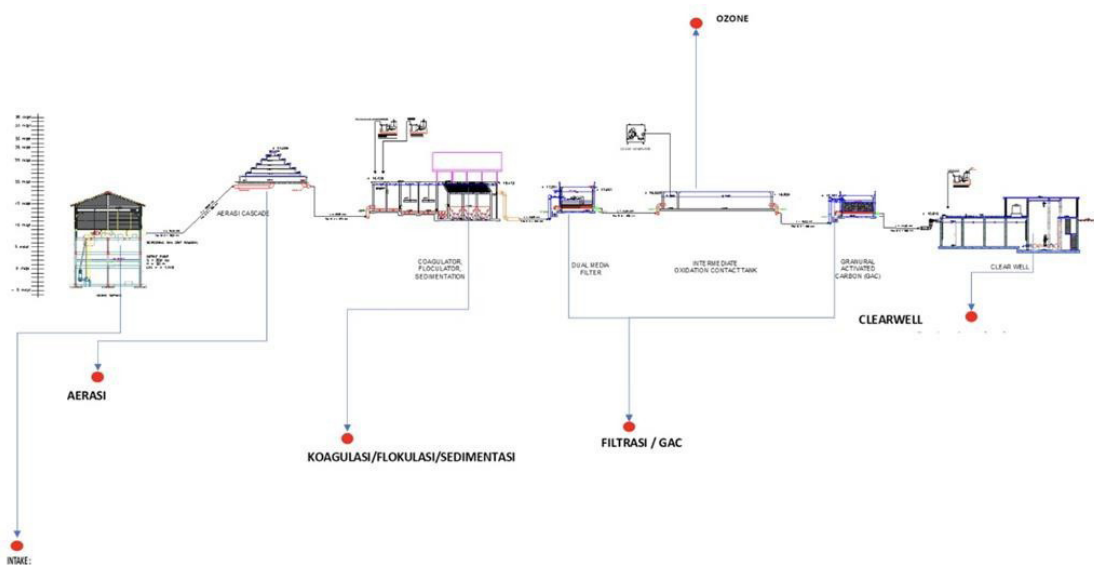
Selain Permenkes 2/2023, regulasi lain yang bisa dijadikan rujukan untuk pemantauan operasional IPA adalah Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (Permenpu) nomor 26 tahun 2014 tentang Prosedur Operasional Standar Pengelolaan Sistem Penyediaan Air Minum. Para regulasi Permenpu ini terdapat informasi yang sangat spesifik mengenai prosedur operasional termasuk parameter-parameter yang harus dipantau dan intervensi yang harus dilakukan oleh operator IPA pada kondisi-kondisi tertentu.

Berdasarkan peraturan tersebut, secara garis besar metode pemantauan kualitas air dapat dilasifikasikan menjadi dua bagian, yaitu pemantauan operasional dan pemantauan kualitas air produksi. Parameter pemantauan operasional merupakan parameter yang dipantau untuk memastikan unit-unit pengolahan di IPA berfungsi dengan baik, sedangkan parameter air produksi merupakan parameter yang dipantau untuk memastikan kepatuhan pada regulasi persyaratan kualitas air minum (lihat tabel 22). Berdasarkan hasil pedoman literatur, perlu disampaikan juga bahwa pemantauan parameter mikrobiologis di regulasi Permenkes RI relatif tidak berubah selama 30 tahun terakhir dimana masih terbatas pada E. Coli dan Total Coliform. Maka apabila di IKN ingin menerapkan standar yang lebih tinggi, perlu dipertimbangkan juga untuk memantau parameter mikrobiologis yang lain seperti *Cryptosporidium*, *Legionella*, *Gardia Lamblia* atau *Mycobacteria*.

Tabel 22. Rekomendasi Parameter Pemantauan Kualitas Air

Pemantauan Operasional	Pemantauan Air Produksi
<ol style="list-style-type: none"> 1. Kekeruhan 2. pH 3. Residu klor 4. <i>Water level</i> 5. Debit / Tekanan 6. <i>Sludge blanket level</i> 7. <i>Oxidation-reduction potential (ORP)</i> 8. <i>Streaming current monitor (SCM)</i> 	<ol style="list-style-type: none"> 9. E. Coli 10. Total Coli 11. Suhu 12. TDS 13. Kekeruhan 14. Warna 15. Bau 16. pH 17. Nitrat 18. Nitrit 19. Kromium hexavalent 20. Besi 21. Mangan 22. Sisa klor 23. Arsen 24. Kadmium 25. Timbal 26. Fluoride 27. Aluminium

Sumber: (Olahan Penulis, 2023)



Gambar 49. Diagram Alir Pengolahan Air di IPA yang Rencanakan Pihak PUPR

Sumber: (Dokumen PUPR, 2023)

Untuk saat ini, desain proses pengolahan air yang direncanakan oleh pihak PUPR mengacu kepada IPA Hwaseong (Korea Selatan) yang telah di sesuaikan dengan kebutuhan di Nusantara dengan unit seperti bangunan intake, aerasi, koagulasi/flokulasi/sedimentasi, filtrasi, ozone, dan *granual activated carbon* (GAC). Untuk memantau proses operasionalnya, menurut dokumen PUPR tahun 2021 direncanakan pemasangan beberapa instrumen pada beberapa unit pengolahan seperti berikut.

- 1) **Intake**
 - a. Flow Meter
- 2) **Pompa Intake**
 - a. Level Control
 - b. Tekanan Pompa
 - c. Sensor Power
 - d. Panel Sensor
- 3) **Prasedimentasi**
 - a. Sensor Kekeruhan
- 4) **Koagulasi**
 - a. Streaming Current Monitoring (SCM)
 - b. Automatic Dosing System
 - c. Turbidity Meter On Line (A/B, after)
 - d. pH On Line with temperature compensation
 - e. Ultrasonic Level Transmitter

- 5) **Flokulasi**
 - a. Turbidity Meter On Line (A/B, after)
 - b. pH On Line with temperature compensation
 - c. Ultrasonic Level Transmitter
 - d. Aktuator
 - e. Sensor Keketuhan
- 6) **Sedimentasi**
 - a. Turbidity Meter On Line (A/B, after)
 - b. pH On Line with temperature compensation
 - c. Ultrasonic Level Transmitter
 - d. Sludge Finder
 - e. Aktuator
- 7) **Filtrasi**
 - a. Level Control
 - b. AktuatorTurbidity Meter On Line (A/B, after)
 - c. pH On Line with temperature compensation
 - d. Ultrasonic Level Transmitter
- 8) **Reservoir**
 - a. Level ControlTurbidity Meter On Line (A/B, after)
 - b. pH On Line with temperature compensation
 - c. Flow Meter
 - d. Sensor Sisa Ozon
- 9) **Pompa Distribusi**
 - a. Sensor tekanan
 - b. Flow Meter
 - c. Panel Pompa
- 10) **Jaringan Distribusi**
 - a. Flow Meter (pada DMA)

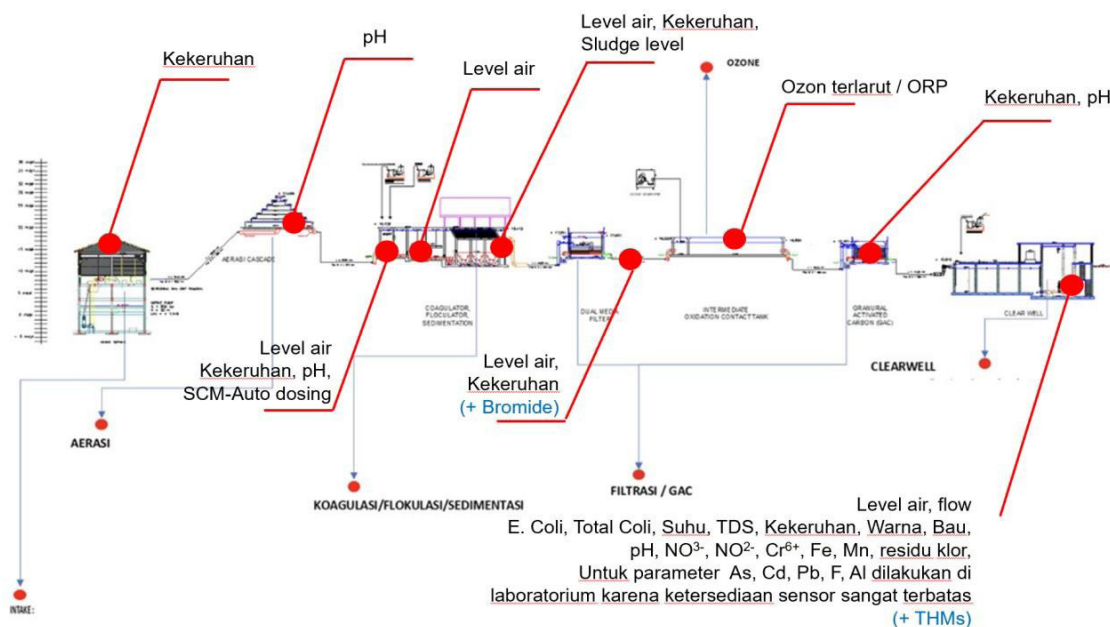
3.1.2 Konsep Implementasi Sensor dan Sistem Intervensi

Dengan mempertimbangkan desain pemasangan sensor di IPA IKN yang telah dibuat oleh PUPR, terdapat dua rekomendasi yang dapat diberikan. Rekomendasi tersebut berupa penambahan jenis sensor dan alat pendukungnya serta tidak melakukan perubahan jenis sensor yang telah direncanakan oleh pihak PUPR.

- Rekomendasi A (*Direct Monitoring*)

Merupakan rekomendasi aplikasi smart sensor yang menekankan pada pemantauan hampir seluruh parameter kualitas air produksi yang diatur oleh regulasi Permenkes

2/2023 dengan menggunakan smart sensor. Berdasarkan hasil pedoman literatur mengenai ketersediaan smart sensor, 15 dari 19 parameter wajib air baku sudah tersedia metode pemantauan dengan menggunakan smart sensor kecuali untuk Arsen, Kadmium, Timbal, Aluminium (**Error! Reference source not found.51**). Rekomendasi ini memiliki kelebihan yang terletak pada tingkat kepatuhan yang sangat tinggi pada persyaratan pemantauan berkala yang diatur oleh regulasi Permenkes 2/2023. Hal ini tentu memberikan keamanan air yang tinggi untuk 15 parameter yang dipantau secara langsung dengan smart sensor yaitu E. Coli, Total Coli, Suhu, TDS, Kekeruhan, Warna, Bau, pH, Nitrat, Nitrit, Kromium hexavalent, Besi, Mangan, Sisa klor, dan Fluoride. Namun penerapan rekomendasi ini tentu memiliki tantangan dari sisi biaya investasi yang besar. Tantangan juga muncul dari aspek integrasi dari antar sensor dengan sistem kontrol pusat dan perekaman data karena mungkin diperlukan pemakaian berbagai merek sensor untuk memantau sejumlah 15 parameter.



Gambar 50. Rekomendasi Pertama (Direct Monitoring) Pemasangan Sensor dan Perangkat Pendukung di IPA IKN
 Sumber: (Olahan Penulis 2023)

Dalam penerapan rekomendasi tersebut dapat dilakukan dalam 2 tahap yaitu jangka pendek / opsi minimum dan jangka panjang / opsi optimum (Tabel 23). Opsi minimum fokus implementasi smart sensor untuk mendukung operasional instalasi. Apabila memungkinkan, smart sensor coliform juga sudah diaplikasikan untuk meningkatkan keamanan air. Pada opsi optimum atau untuk jangka panjang, pemantauan air produksi dapat diperluas untuk berbagai parameter lain. Namun, untuk pemantauan berkala parameter logam berat seperti Aluminium, Arsen, Kadmium, Timbal tetap dilakukan di laboratorium karena belum tersedia smart sensor dengan limit deteksi yang kompatibel dengan regulasi Permenkes 2/2023.

Tabel 23. Opsi Minimum dan Optimum dari Penerapan Rekomendasi Direct Monitoring Pemasangan Sensor dan Perangkat

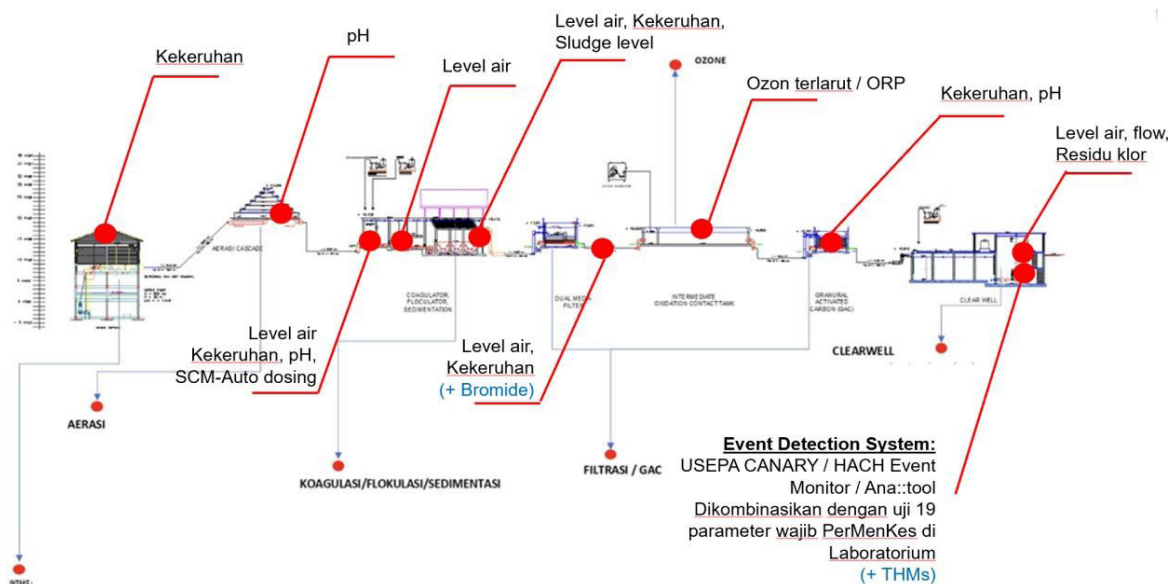
Metode Pemantauan	Opsi Minimum	Opsi Optimum	Catatan
<p>Direct monitoring: Sensor untuk pemantauan operasional dan air produksi</p>	<p><u>Operasional:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Sensor: Kekeruhan, pH, Residu klor, Water level, Debit / Tekanan, Sludge finder, SCM • Sistem respon: notifikasi dan manual <p><u>Air Produksi:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Sensor: E. Coli, Total Coli, Suhu, TDS, Kekeruhan, Warna, Bau, pH • Lab: Nitrat, Nitrit, Kromium hexavalent, Besi, Mangan, Sisa klor, Arsen, Kadmium, Timbal, Fluoride, Aluminium 	<p><u>Operasional:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Sensor: Kekeruhan, pH, Residu klor, Water level, Debit / Tekanan, Sludge finder, SCM • Sistem respon: notifikasi dan otomatis <p><u>Air produksi:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Sensor: E. Coli, Total Coli, Suhu, TDS, Kekeruhan, Warna, Bau, pH, Nitrat, Nitrit, Kromium hexavalent, Besi, Mangan, Sisa klor, Fluoride • Lab: Arsen, Kadmium, Timbal, Aluminium 	<p><u>Prinsip:</u> Pemantauan kualitas air produksi dipantau secara langsung dengan smart sensor.</p> <p><u>Pentahapan:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Opsi minimum: fokus implementasi smart sensor untuk mendukung operasional instalasi. Apabila memungkinkan, smart sensor Coliform juga sudah diaplikasikan untuk meningkatkan keamanan air. • Opsi Optimum: pemantauan air produksi diperluas untuk berbagai parameter lain terutama besi dan logam. Namun, untuk pemantauan berkala parameter logam berat seperti Arsen, Kadmium, Timbal, Aluminium tetap dilakukan di laboratorium karena belum tersedia smart sensornya. <p><u>Keunggulan:</u> Tingkat keamanan tinggi pada parameter kualitas air yang dipantau dengan smart sensor; tersedia big data untuk berbagai parameter syarat kualitas air minum yang dapat dianalisis lebih lanjut untuk optimasi proses pengolahan.</p> <p><u>Tantangan:</u> Biaya investasi dan operasional sangat tinggi untuk penyediaan beragam hardware sensor dan reagen operasional; Potensi tantangan sinkronisasi berbagai merek sensor.</p>

Sumber:(Olahan Penulis, 2023)

- Rekomendasi B (Indirect Monitoring)

Pada rekomendasi B, diusulkan pemantauan pada air produksi dilakukan dengan event detection system (EDS). Event detection system merupakan suatu sistem deteksi berbagai kontaminan berdasarkan pada anomali konsentrasi parameter sensitive (seperti residu klor, TOC, pH, konduktivitas, dll) terhadap baseline konsentrasi, yang dikombinasikan dengan sistem kecerdasan buatan. EDS mampu memprediksi fingerprint anomali konsentrasi parameter sensitif sebagai prediksi kontaminasi oleh kontaminan tertentu. Apabila terjadi deteksi kontaminasi, maka EDS akan mengirimkan alarm notifikasi pada operator dan sampling otomatis. Hasil sampling otomatis ini dapat ditindaklanjuti dengan uji laboratorium. EDS umumnya disediakan dalam satu kesatuan paket yang terdiri dari beberapa sensor, terminal kontrol dan software. Beberapa contoh EDS yang cukup populer adalah Ana::tool, USEPA CANARY, dan Hach Event Monitor™.

Metode indirect dengan EDS ini memiliki kelebihan yang terletak pada investasi peralatan yang berpotensi lebih murah dibandingkan dengan metode direct, karena jumlah sensor yang digunakan akan jauh lebih sedikit dari rekomendasi A (direct monitoring). Tantangan dari aplikasi EDS adalah kemungkinan terjadinya false alarm yang cukup tinggi, sehingga berpotensi mengganggu kinerja operator.



Gambar 51. Rekomendasi Kedua (Indirect Monitoring) Pemasangan Sensor dan Perangkat Pendukung di IPA IKN
Sumber: (Olahan Penulis 2023)

Tabel 24. Opsi Minimum dan Optimum dari Penerapan Rekomendasi Indirect Monitoring Pemasangan Sensor dan Perangkat

Metode Pemantauan	Opsi Minimum	Opsi Optimum	Catatan
<i>Indirect monitoring</i> – Sensor untuk pemantauan operasional dan <i>contamination detection system</i>	<p>Operasional:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sensor: Kekeruhan, pH, Residu klor, Water level, Debit / Tekanan, Sludge finder, SCM • Sistem respon: notifikasi dan manual <p>Air produksi:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Event detection system</i> (spesifikasi minimum) • Seluruh parameter syarat kualitas air minum diuji di Lab 	<p>Operasional:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sensor: Kekeruhan, pH, Residu klor, Water level, Debit/Tekanan, Sludge finder, SCM • Sistem respon: notifikasi dan otomatis <p>Air produksi:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Event detection system</i> (spesifikasi lengkap) • Seluruh parameter syarat kualitas air minum diuji di Lab 	<p>Prinsip:</p> <p>Pemantauan kualitas air produksi dilakukan dengan kombinasi <i>event detection system</i> dan uji lab. <i>Event detection system</i> (EDS) merupakan suatu sistem deteksi berbagai kontaminan berdasarkan anomali konsentrasi parameter sensitive seperti pH, residu klor, TOC terhadap baseline. Sensor dikombinasikan dengan analisis database fingerprint kontaminan dalam suatu sistem terintegrasi.</p> <p>EDS berperan sebagai <i>early warning system</i> untuk mengidentifikasi potensi kontaminasi. Konfirmasi dilakukan dengan uji sampel di laboratorium.</p> <p>Keunggulan:</p> <p>Biaya investasi lebih rendah daripada opsi <i>direct monitoring</i>; Cakupan deteksi sangat luas untuk berbagai kontaminan bahkan juga berpotensi mendeteksi <i>chemical warfare</i> (racun dan senjata kimiawi/biologis)</p> <p>Tantangan:</p> <p>Pada beberapa kasus, EDS dapat terlalu sensitive menyebabkan banyak “false- alarm”.</p>

Sumber: (Olahan Penulis 2023)

Dalam menentukan jenis sensor yang akan dipakai, rekomendasi disesuaikan dengan peraturan mengenai baku mutu kualitas air minum Permenkes no 2 tahun 2023. Pada operasional IPA, selain mengacu kepada baku mutu tiap jenis sensor yang direkomendasikan memiliki argumentasi yang dapat mempengaruhi keberhasilan proses pengolahan air maupun mengganggu operasional IPA. **Error! Reference source not found.** menjelaskan terkait jenis lokasi, jenis, argumentasi hingga sistem intervensinya.

Tabel 25. Argumentasi Sensor Yang Direkomendasikan dan Sistem Intervensinya.

No.	Lokasi	Sensor	Argumentasi sensor	Sistem intervensi otomatis
1	Intake	Kekeruhan	Sensor kekeruhan untuk antisipasi kekeruhan tinggi di air baku	Kekeruhan tinggi (misal > 600 NTU*) → dosing polimer di koagulasi / tutup sementara gate valve di intake
2	Outlet aerasi	pH	Sensor pH untuk mendukung operasional SCM di unit koagulasi	pH < 6,5 → Dosing basa pH > 7,5 → Dosing asam
3	Unit koagulasi	Level air	Sensor level air untuk identifikasi potensi sumbatan aliran / endapan	Notifikasi ke operator
		Kekeruhan	Untuk asesmen kinerja proses koagulasi-flokulasi-sedimentasi	Perekaman data
		pH	Operator perlu cek alkalinitas air baku dilab	pH < 6,5 atau pH > 7,5 → Notifikasi operator
		SCM	Penyesuaian otomatis dosing koagulan	Dosing ditingkatkan jika streaming current < -10 mV
4	Unit flokulasi	Level air	Potensi sumbatan aliran / endapan	Notifikasi ke operator
5	Sedimentasi	Level air	Identifikasi potensi sumbatan aliran / endapan	Notifikasi ke operator
		Kekeruhan	Asesmen kinerja proses koagulasi-flokulasi-sedimentasi	Kekeruhan pada outlet > 10 NTU → Notifikasi operator
		Sludge level	Identifikasi volume lumpur di bak sedimentasi	Sludge level > ruang lumpur → buka valve pembuangan lumpur
6	Dual media filter	Level air	Identifikasi clogging filter	Level air sampai pada limit → Backwash
		Kekeruhan	Identifikasi clogging filter	Kekeruhan pada outlet > 1 → Backwash
		Bromide	Antisipasi pembentukan bromate (perlu pedoman lebih lanjut)	Perlu pedoman lebih lanjut

No.	Lokasi	Sensor	Argumentasi sensor	Sistem intervensi otomatis
7	Intermediate oxidation contact tank	Ozon terlarut	Identifikasi kondisi ozone generator	Residu ozon drop dibawah tipikal → notifikasi ke operator
		ORP	Identifikasi kondisi ozone generator	Residu ozon drop dibawah tipikal → notifikasi ke operator
8	GAC filter	Kekeruhan	Asesmen kinerja proses koagulasi-flokulasi-sedimentasi	Kekeruhan pada outlet >1 NTU → Backwash
		pH	untuk mendukung operasional desinfeksi	pH < 6,5 → Dosing basa pH > 7,5 → Dosing asam
9	Clear Well	Residu klor	Untuk mendukung operasional desinfeksi	Residu klor di reservoir < 1 mg/L → debit dosing klor ditingkatkan
		Level air	Identifikasi potensi sumbatan aliran	Notifikasi ke operator
		Flow	Identifikasi kondisi pompa transmisi air produksi	Notifikasi ke operator
	Clear well (rekomendasi <i>direct</i> monitoring)	E. Coli, Total Coli, Suhu, TDS, Kekeruhan, Warna, Bau, pH, NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , Cr ₆ ⁺ , Fe, Mn	Pemantauan standar kualitas air minum sesuai PerMenKes 2/2023	Bisa konsentrasi > Standar baku mutu → Notifikasi ke operator
		Trihalomethanes	Identifikasi disinfection by products	Notifikasi ke operator dan user (status sementara menjadi air non-potable)
Clear well (rekomendasi <i>indirect</i> monitoring)	Even detection system	Pemantauan surrogate indicator (residu klor, klorida, pH, dll sesuai vendor) untuk analisis fingerprint kontaminan	Notifikasi ke operator dan user (status sementara menjadi air non-potable)	

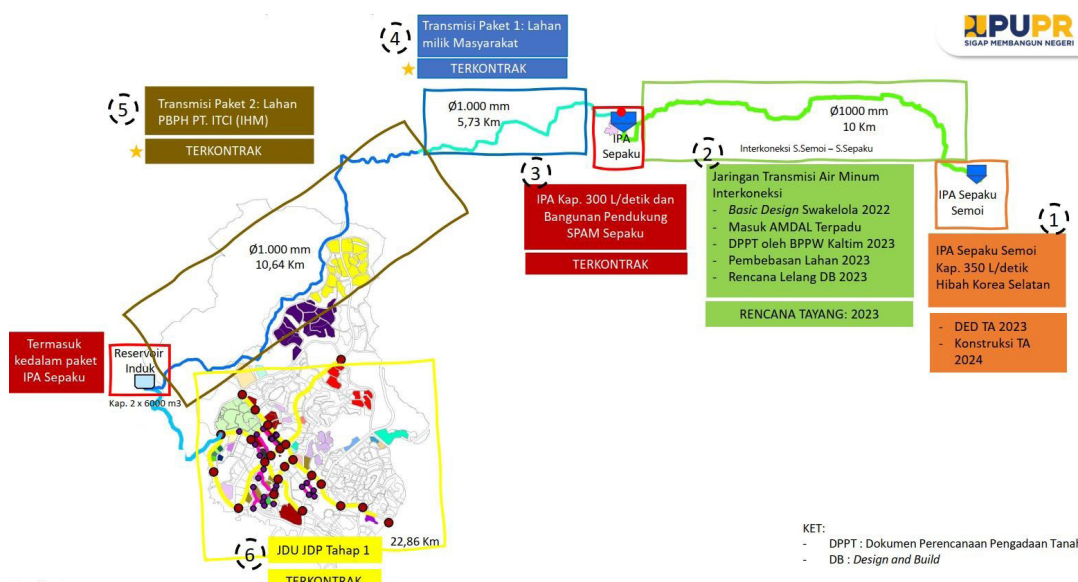
Sumber: (Olahan Penulis 2023)

4.2 Transmisi dan Distribusi Air di SPAM KIPP IKN

4.2.1 Transmisi Air Baku ke IPA

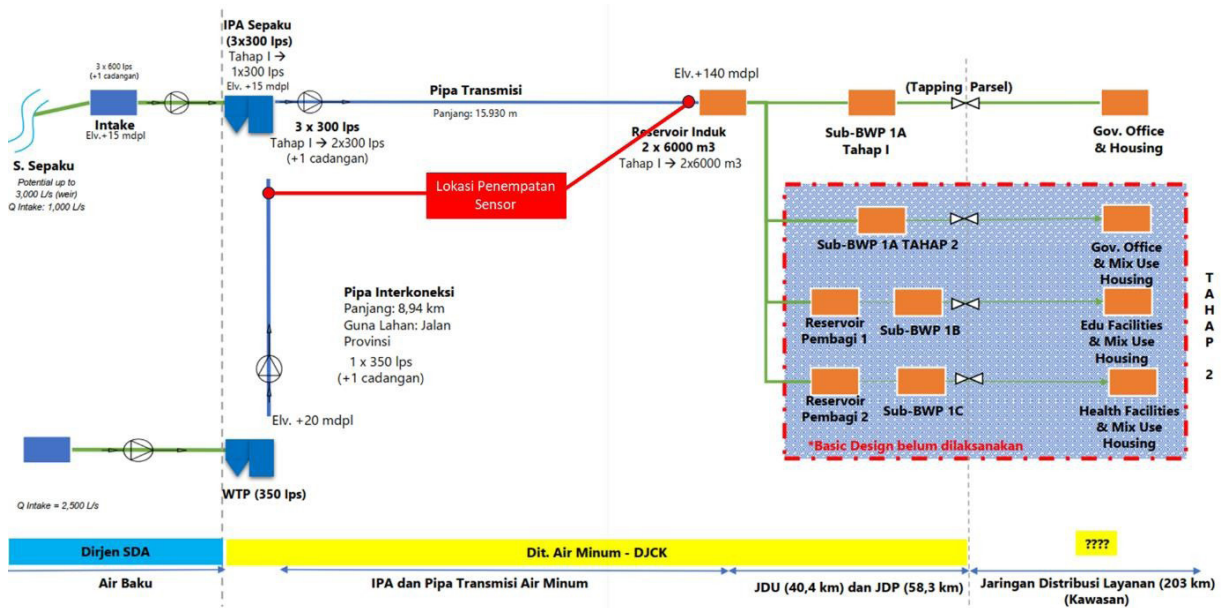
4.2.1.1 Lokasi Penempatan Sensor

Dalam pemenuhan kebutuhan air bersih di KIPP IKN, air yang telah diolah baik dari IPA Sepaku Semoi dan IPA Sepaku di transmisikan menuju sebuah reservoir induk yang memiliki kapasitas sebesar 12.000 m³ (gambar 53). IPA Sepaku Semoi direncanakan memiliki kapasitas produksi dan distribusi sebesar 350 L/detik dan IPA Sepaku memiliki kapasitas sebesar 300 L/detik. Jika digabungkan maka air bersih total yang ditransmisikan ke reservoir induk sebesar 650 L/detik. Interkoneksi pipa distribusi antar IPA Sepaku Semoi menuju IPA Sepaku sepanjang ±10 km yang kemudian ditransmisikan menuju reservoir induk sepanjang ± 17 km. Material transmisi yang dipergunakan untuk proses transmisi ini merupakan pipa *steel* dengan ukuran diameter 1000 mm atau 1 meter. Untuk penempatan sensor, tidak ada regulasi dalam skala nasional atau internasional yang menjelaskan antara jumlah penempatan sensor dengan panjang jaringan. Berdasarkan prinsip hidrolika, pemasangan alat pengukuran dilakukan apabila ada pipa percabangan. Selain itu, berdasarkan pengalaman dilapangan, penambahan alat ukur berpotensi meningkatkan *non revenue water* pada jaringan transmisi. Pada Pipa Transmisi, penempatan sensor diletakkan sebelum air minum yang telah diolah masuk ke reservoir IPA Sepaku maupun Reservoir Induk (Gambar 53).



Gambar 52. Peta Transmisi air minum dari IPA Sepaku Semoi dan IPA Sepaku menuju wilayah KIPP IKN

Sumber: Dokumen FGD Water Management Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Cipta Karya Direktorat Air Minum



Gambar 53. Skema Transmisi air minum dari IPA Sepaku Semoi dan IPA Sepaku menuju wilayah KIPP IKN beserta dengan lokasi penempatan sensor

Sumber: Dokumen FGD Water Management Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Cipta Karya Direktorat Air Minum



4.2.1.2 Parameter dan Jenis Sensor

Parameter pemantauan kuantitas air sungai merupakan komponen yang wajib diukur untuk pipa transmisi dari unit IPA Sepaku Semoi dan IPA Sepaku hingga Reservoir induk dengan panjang total ± 27 Km. Hal ini bertujuan untuk mendeteksi kebocoran (*Non-Revenue Water*) yang terjadi selama proses transmisi yang berdampak terhadap berkurangnya kapasitas air bersih. Untuk parameter yang diusulkan dalam pemantauan kuantitas meliputi flow meter dan pressure sensor. Penggunaan flow meter dapat mendeteksi kebocoran apabila terjadi perubahan flow pada 2 titik jaringan transmisi. Selain flow meter, kehilangan tekanan juga merupakan indikator adanya kebocoran pada perpipaan.

Pemantauan Parameter kualitas pada tahapan transmisi tidak diperlukan akan tetapi, pengukuran kualitas dilaksanakan pada reservoir induk yang mengacu terhadap Permenkes No. 2 Tahun 2023 untuk Baku Mutu Wajib Air Minum.

4.2.1.3 Tahapan Implementasi

Tabel 26. Rekomendasi Opsi Minimum dan Optimum Pada Pemasangan Sensor Dalam Jaringan Distribusi Air Minum

	Minimum	Optimum
Lokasi	<ul style="list-style-type: none"> • Sebelum <i>reservoir</i> (<i>Clearwell</i>) IPA Sepaku • Sebelum <i>reservoir</i> Induk 	<ul style="list-style-type: none"> • Sebelum <i>reservoir</i> (<i>Clearwell</i>) IPA Sepaku • Sebelum <i>reservoir</i> Induk • Setiap percabangan pipa atau interkoneksi antara jaringan utama dengan jaringan lain
Parameter	Kuantitas: Pressure / flowmeter	Kuantitas: Pressure / flowmeter Kualitas: Microorganisme (mendeteksi biofouling pada pipa transmisi)
Sensor	<p>Flowmeter</p>  <p>Magnetic Flow Meter Emerson Rosemount 8750W Diameter Pipa : 0.5" – 48" (15 mm – 1200 mm) Akurasi: 0.5%; hingga 0.25% kesalahan baca Output Transmitter: 4-20 mA Digital Electronics (HART Protocol), Modbus RS485 Pemasangan: In line pipe</p>	<p>Biofouling Sensor</p>  <p>Alvim biofilm sensor Sensitivitas: 1-100% dari permukaan yang tertutupi biofilm (i.e. the first bacterial layer) Output Transmitter: 4-20 mA and RS485/ MODBUS RTU Pemasangan: Insertio Pipa (40 – 150 mm) ISO2852, 1" BSPP thread.</p>

	Minimum	Optimum
	 <p>Insertion Ultrasonic Flowmeter SCL-7076 Diameter pipa: 80 mm ~2000 mm Output Transmitter: 4-20 mA Digital Electronics (HART Protocol), Modbus RS485 Penyimpanan data: EEPROM Pemasangan: Insertio</p>  <p>Rentang bacaan: -2000 to 2000 psi Output Transmitter: 4-20 mA with Digital Signal Based on HART® Protoco</p>	

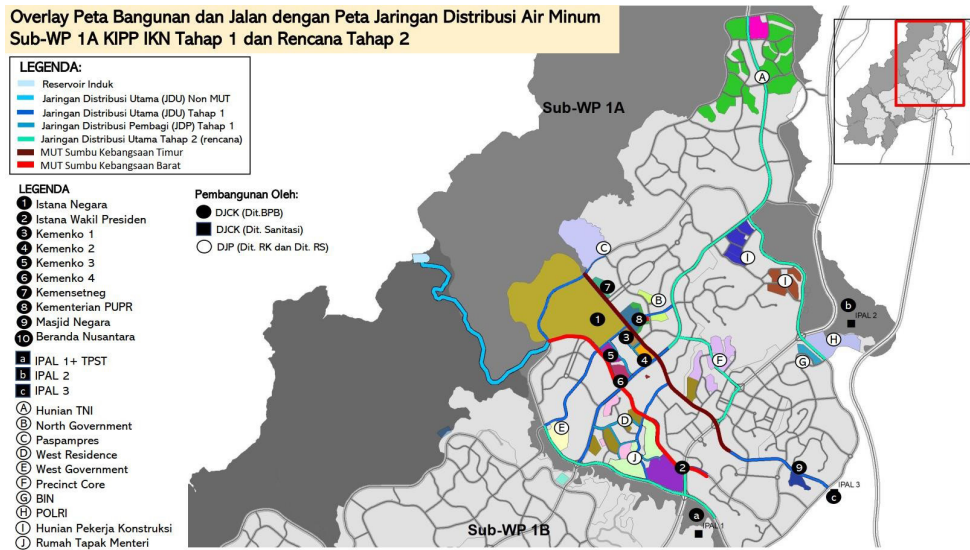
Sumber: (Olahan Penulis, 2023)

4.2.2 Distribusi Air Minum

4.2.2.1 Lokasi penempatan sensor

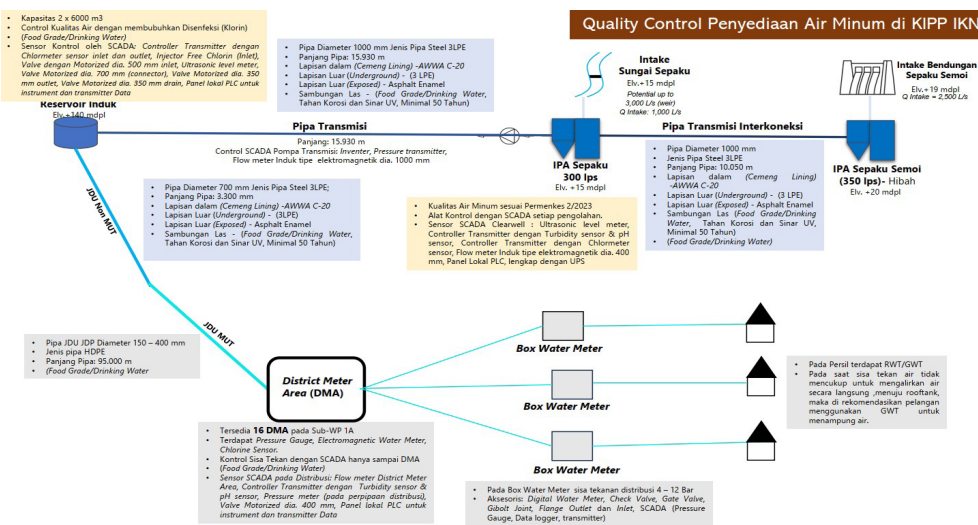
Perencanaan sistem distribusi air minum pada tahap awal difokuskan untuk pemenuhan kebutuhan daerah KIPP IKN. Air bersih pada Reservoir induk dengan kapasitas 12.000 m³

didistribusikan menuju daerah-daerah strategis dan pemukiman (Gambar 54). Kemudian, pemantauan kualitas pada jaringan distribusi pada wilayah KIPP mempergunakan sistem *District Meter Area* (DMA). Seperti yang dijelaskan pada bagian sebelumnya, konsep DMA adalah mengklasifikasikan daerah pelayanan menjadi beberapa wilayah (gambar 55).



Gambar 54. Peta jaringan distribusi air minum wilayah KIPP

Sumber: Dokumen FGD Water Management Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Cipta Karya Direktorat Air Minum



Gambar 55. Skema jaringan distribusi air minum wilayah KIPP

Sumber: Dokumen FGD Water Management Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Cipta Karya Direktorat Air Minum



4.2.2.2 Parameter dan jenis sensor

Pemantauan Parameter pada distribusi mengacu kepada 2 aspek yaitu parameter kualitas dan kuantitas. Pemantauan parameter kualitas bertujuan untuk menjamin kelayakan

dari air yang didistribusikan dengan mengacu terhadap Permenkes No. 2 Tahun 2023 untuk Baku Mutu Wajib Air Minum. Sedangkan pemantauan parameter kuantitas bertujuan untuk meminimalisir *Non-Revenue Water*. Pemantauan kualitas pada jaringan distribusi utama dapat mempergunakan multiparameter (Warna/UV, TDS, Kekeruhan, Suhu, Residu Klor, pH, Coliform dan logam berat) dan Flowmeter. Pada jaringan servis yang mempergunakan sistem distrik area meliputi pengukuran pH, Suhu, TDS/Residu Klor, dan flowmeter.

4.2.2.3 Tahapan implementasi

Tabel 27. Rekomendasi Opsi Minimum dan Optimum Pada Pemasangan Sensor Dalam Jaringan Distribusi Air Minum

	Minimum	Optimum
Lokasi	<ul style="list-style-type: none"> Setiap District Area Meter 	Setiap District Area Meter
Parameter	Kuantitas: Pressure / flowmeter Kualitas: Kekeruhan, pH, residu Klorin	Kuantitas: Pressure / flowmeter Kualitas: Kekeruhan, pH, residu Klorin, Biofilm
Sensor	<p style="text-align: center;">Kuantitas</p> <p style="text-align: center;">- Flowmeter</p>  <p>Magnetic Flow Meter Emerson Rosemount 8750W Diameter Pipa : 0.5” – 48” (15 mm – 1200 mm) Akurasi: 0.5%; hingga 0.25% kesalahan baca Output Transmitter: 4-20 mA Digital Electronics (HART Protocol), Modbus RS485 Pemasangan: In line pipe</p>	<p style="text-align: center;">Kualitas</p> <p style="text-align: center;">- Biofouling Sensor</p>  <p>Alvim biofilm sensor Sensitivitas: 1-100% dari permukaan yang tertutupi biofilm (i.e. the first bacterial layer) Output Transmitter: 4-20 mA and RS485/ MODBUS RTU Pemasangan: Insertio Pipa (40 – 150 mm) ISO 2852, 1” BSPP thread.</p>

	Minimum	Optimum
	 <p>Insertion Ultrasonic Flowmeter SCL-7076 Diameter pipa: 80 mm ~ 2000 mm Output Transmitter: 4-20 mA Digital Electronics (HART Protocol), Modbus RS485 Penyimpanan data: EEPROM Pemasangan: Insertio - Pressure</p>  <p>Rentang bacaan: -2000 to 2000 psi Output Transmitter: 4-20 mA with Digital Signal Based on HART® Protoco Kualitas - pH (Lampiran 6) S::Can pH::lyser eco/pro</p>	

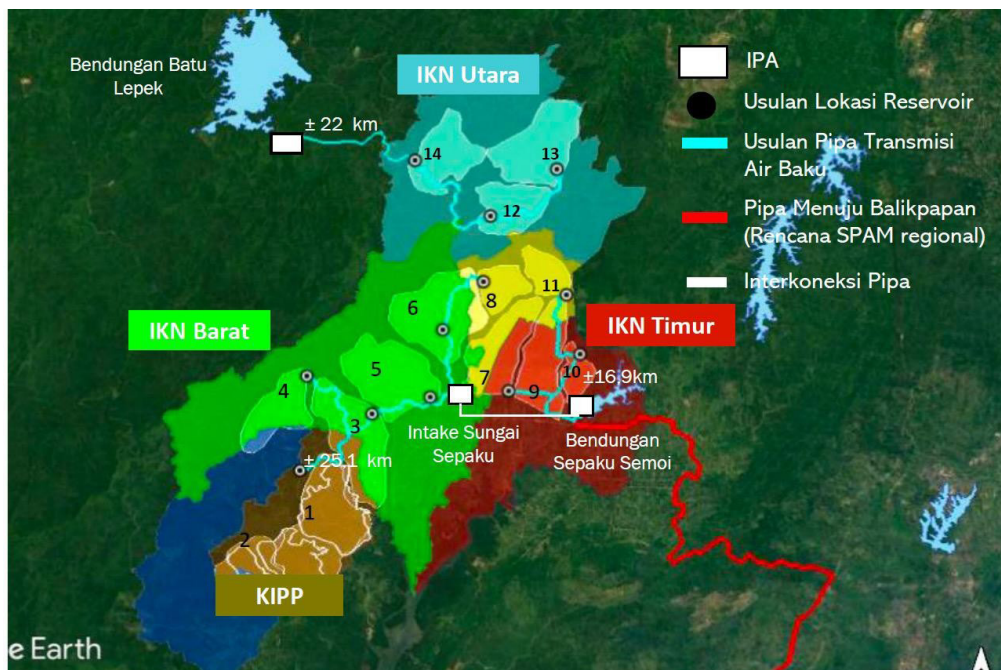
	Minimum	Optimum
	Boqu BH-485-PH8012 Firstrate FST100- PH104 Endress Hauser CPS31E Xylem Sen- soLyt -Kekeruhan (Lampiran 6) S::Can Model: uv::lyser V3Boqu ZDYG-2088- 01QX Firstrate FST100- ZD102 Endress Hauser Turbi- maxCUS52D Xylem VisoTurb InSitu TurbiTech D-ISOTurbidity Sensor -Sisa Klorin (Lampiran 6)S::Can Chlori::Lyser Boqu BH-485-CL2407 Firstrate FST100- YL105 Endress Hauser CCS51E	

Sumber: (Olahan Penulis, 2023)

4.3 Pemantauan Kualitas Sungai (*River Pollution Monitoring*)

4.3.1 Lokasi Penempatan Sensor

Air baku yang digunakan pada SPAM KIPP IKN berasal dari Sungai Sepaku. Oleh karena itu, perlu dilakukan pemantauan kualitas air baku pada bangunan intake IPA. Sensor pemantauan kualitas air akan diletakkan pada bangunan intake Sungai Sepaku dan Bendungan Sepaku Semoi (Gambar 57).



Gambar 56. Lokasi Penempatan Sensor

Sumber: (Olahan Penulis 2023)

4.3.2 Parameter dan Jenis Sensor

Parameter pemantauan kualitas air sungai mengacu kepada Baku Mutu Air Kelas I PP nomor 22 Tahun 2021. Parameter yang diusulkan pada pemantauan ini mengacu pada sistem pemantauan sistem pemantauan kualitas air secara kontinu, otomatis dan daring, atau sistem Onlimo, yang telah dikembangkan oleh KLHK. Berdasarkan sistem ini, maka rekomendasi penggunaan parameter pemantauan air baku berdasarkan situs Onlimo, dimana terdapat 8 parameter yang dipantau, yaitu: Amonia, BOD, COD, DO, Nitrat, pH, TDS, dan TSS.

4.3.3 Opsi Implementasi

Opsi implementasi untuk pemantauan kualitas air baku dibagi menjadi dua, yaitu opsi minimum dan optimum (Tabel 29). Pada opsi minimum, parameter pemantauan yang diusulkan mengacu pada parameter eksisting dari sistem Onlimo, seperti Ammonia, BOD, COD, DO, Nitrat, pH, TDS, dan TSS. Sementara itu, pada opsi optimum, parameter yang diusulkan mengacu pada “Pilihan 3” pada Peraturan Direktur Jenderal Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan nomor P.7/PPKL/PPA/PKL.2/3/2019). Pada peraturan ini, diusulkan dapat mengukur minimal 11 parameter standar, yaitu BOD, COD, suhu air, DO, pH, ORP, kekeruhan, salinitas, ammonia, nitrat, kedalaman/tinggi muka air. Jika pembacaan dari sensor–sensor tersebut melebihi baku mutu, maka sistem diharapkan dapat

memberikan notifikasi waspada kepada IPA. Oleh karena itu, diperlukan sinkronisasi antara sistem pemantauan kualitas air sungai yang telah dikembangkan melalui Onlino dengan sistem SCADA yang diimplementasikan di IPA.

Selain itu, jika terdapat rencana pemanfaatan Sungai Mahakam sebagai sumber air baku KIPP dalam jangka Panjang, maka disarankan untuk memasang sensor pemantauan kualitas air di intake Sungai Mahakam. Beberapa parameter logam berat perlu dipantau karena di sekitar Sungai Mahakam terdapat kegiatan pertambangan yang berpotensi mencemari air sungai. Adapun logam berat yang dimaksud dapat merujuk kepada Lampiran VI PP 22 tahun 2021, yaitu Barium, Boron, Merkuri, Arsen, Selenium, Besi, Kadmium, Kobalt, Mangan, Nikel, Seng, Tembaga, Timbal, dan Kromium Heksavalen (Cr-(VII)). Berdasarkan pedoman kepustakaan lebih lanjut, parameter logam berat yang dapat dipantau secara langsung menggunakan sensor yang ada di pasaran saat ini adalah arsen, kadmium, tembaga, dan timbal.

Tabel 28. Implementasi Pemantauan Kualitas Sungai

	Opsi minimum	Opsi optimum
Lokasi	<ul style="list-style-type: none"> • Intake IPA Sepaku • Bendungan Sepaku Semoi 	<ul style="list-style-type: none"> • Intake IPA Sepaku • Bendungan Sepaku Semoi • Intake sungai Mahakam
Parameter	Parameter eksisting dari sistem onlino: Amonia, BOD, COD, DO, Nitrat, pH, TDS, dan TSS.	<ul style="list-style-type: none"> • Parameter sesuai dengan opsi “Pilihan 3” pada Tabel 18 (sesuai Peraturan Direktur Jenderal Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan nomor P.7/PPKL/PPA/PKL.2/3/2019) <ul style="list-style-type: none"> o BOD, COD, suhu air, DO, pH, ORP, Kekeruhan, salinitas, ammonia, nitrat, kedalaman/tinggi muka air o Harus ada alat pembersih sensor otomatis. • Parameter logam berat apabila akan mengambil air baku di Sungai Mahakam: arsen, kadmium, tembaga, dan timbal. <p>Integrasi antara sistem pemantau kualitas air sungai dengan sistem SCADA di IPA untuk memberikan notifikasi waspada jika kualitas air sungai melebihi baku mutu Kelas 1 PP 22 tahun 2021.</p>

	Opsi minimum	Opsi optimum
Sensor	Sesuai dengan standar minimum spesifikasi teknis sensor pada Tabel 18 (“Pilihan 3” pada Peraturan Direktur Jenderal Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan nomor P.7/PPKL/PPA/PKL.2/3/2019)	<ul style="list-style-type: none"> Sesuai dengan standar minimum spesifikasi teknis sensor pada Tabel 18 (“Pilihan 3” pada Peraturan Direktur Jenderal Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan nomor P.7/PPKL/PPA/PKL.2/3/2019) Sensor logam berat: <ul style="list-style-type: none"> Arsen (0-3 mg/L) Kadmium (0,1-11.200 ppm) Tembaga (1 ppb-6.300 ppm) Timbal (2-20.700 ppm)
Catatan	Opsi ini fokus kepada parameter pemantauan eksisting yang sudah pernah dilakukan dengan sistem Onlino.	<ul style="list-style-type: none"> Keunggulan opsi ini adalah tersedianya parameter pemantauan kualitas air yang lebih lengkap sesuai dengan peraturan. Tantangan dari opsi ini adalah biaya operasional dan investasi yang lebih tinggi karena adanya penambahan parameter pemantauan kualitas air.

4.4 Pengolahan Air Hujan dan *Greywater*

4.4.1 Skema Pengolahan *Greywater* dan *Rainwater*

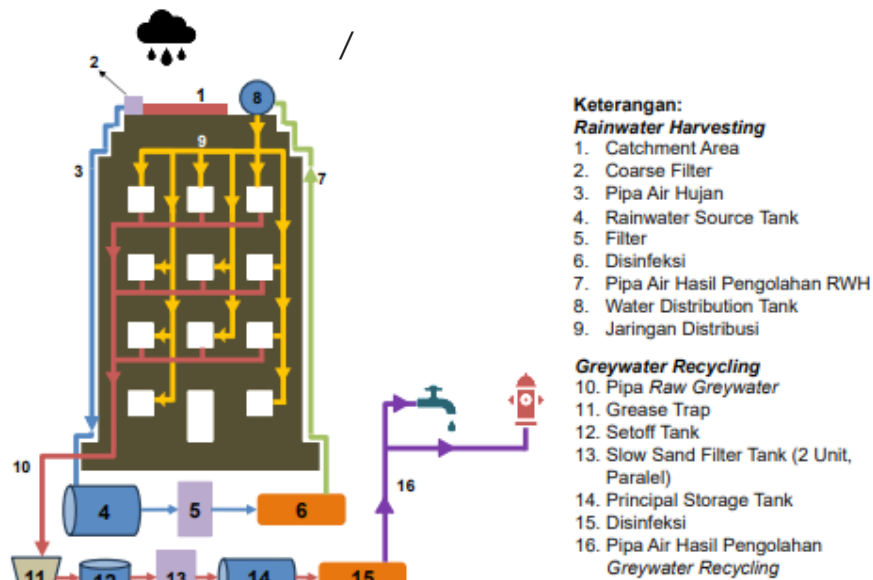
Pemanfaatan *greywater* menjadi salah satu aspek yang dikedepankan dalam mewujudkan *water smart city* dengan menggunakan berbagai sumber air alternatif (termasuk pemanfaatan kembali air limbah) untuk memenuhi kebutuhan konsumsi air harian utamanya untuk kebutuhan *non-potable*. Sehingga, tidak membebani pasokan air bersih untuk memenuhi kebutuhan *non-potable*. Upaya ini juga mendukung pencapaian prinsip ke-5 dari 8 prinsip IKN, yaitu “Sirkular dan Tangguh” yang secara spesifik menjawab poin KPI ke-3 dari prinsip tersebut yaitu “100% air limbah akan diolah melalui sistem pengolahan pada tahun 2035”.

Penggunaan sumber air alternatif pada bangunan gedung telah menjadi aspek yang menjadi perhatian pula dalam pembangunan gedung di kawasan IKN. Dalam dokumen “Panduan Bangunan Cerdas Nusantara”, konsep kota spons berdasarkan rencana induk Ibu Kota Nusantara bertujuan memulihkan dan mempertahankan siklus alami air yang mengalami perubahan akibat adanya alih fungsi lahan dan tutupannya. Konsep tersebut diterapkan hingga skala terkecil yaitu perkotaan permukiman secara terpadu untuk

memperlambat dan menahan aliran air, memanen air hujan, dan meningkatkan penyerapan air hujan ke dalam tanah. Penggunaan air hujan sebagai sumber air alternatif merupakan bagian dari manfaat bangunan gedung cerdas untuk lingkungan poin E3 yaitu “Konservasi Air”. Dalam poin tersebut dijelaskan bahwa pemanenan air hujan merupakan bentuk penggabungan teknologi hemat air dalam bangunan cerdas untuk mengurangi penggunaan air dan menghemat sumber daya.

Dengan merujuk kepada literatur terkait, mempertimbangkan upaya integrasi sistem pengolahan yang dapat menjawab kebutuhan serta target penggunaan air olahan, rekomendasi sistem *greywater recycling* yang akan diimplementasikan di gedung-gedung dalam wilayah KIPP adalah menggunakan skema teknologi *hybrid* yang mengkombinasikan pengolahan *rainwater harvesting* sehingga memungkinkan kedua pengolahan air tersebut dapat terjadi dalam setiap bangunan gedung untuk memenuhi kebutuhan air bersih. Adapun skema *hybrid* akan mengacu pada pembahasan subbab 3.4.1.2 dengan penyesuaian. Target penggunaan air olahan adalah sesuai dengan penjelasan pada subbab 3.4.2. Adapun dirumuskan skema rancangan pengolahan *rainwater* dan *greywater* dengan sistem pengolahan yang dilakukan secara terpisah. Target penggunaan air olahan adalah untuk *non-potable use* seperti *toilet flushing (internal use)* hingga pertamanan dan hidran (*external use*) sehingga dapat menekan penggunaan air bersih untuk kebutuhan *non-potable use* pada bangunan gedung tersebut.

Gambar 58 menunjukkan ilustrasi pengolahan *Greywater Recycling* dan *Rainwater Harvesting*. Air hujan pada awalnya akan ditampung pada *catchment area* di atas atap. Air hujan kemudian masuk ke unit *coarse filter* dan menuju *rainwater source tank* yang terletak di bawah gedung. Air hujan kemudian diolah di unit filtrasi dan disinfeksi. Hasil olahan air hujan kemudian dialirkan menuju atap dengan bantuan pompa yang kemudian didistribusikan ke masing – masing unit di dalam gedung untuk kebutuhan *non-potable*, seperti flushing toilet. Sedangkan *greywater* diolah dengan menggunakan beberapa unit pengolahan, seperti *grease trap*, *slow sand filter*, dan disinfeksi. Air hasil olahan dapat dimanfaatkan untuk pertamanan dan hidran.



Gambar 57. Ilustrasi Skema Rancangan *Greywater Recycling* dan *Rainwater Harvesting*

Sumber: (Olahan Penulis 2023)

Berkaitan dengan estimasi besaran *rainwater source tank* sebagai tangki penampungan air hujan (*raw rainwater*), dibutuhkan besar nilai curah hujan dan luas bidang tangkap (*catchment area*). Sebagai gambaran, berdasarkan data dari dokumen RIT, rata-rata curah hujan di daerah IKN adalah 2.115 mm – 3.726,8 mm per tahun (2001-2019). Berdasarkan data tersebut dan dengan menggunakan data luas bangunan di kawasan Sub-BWP 1 sebagai contoh, yaitu sebesar 168,51 ha (1.685.100 m²) dimana luas atap adalah 70% dari luas bangunan, menggunakan nilai rata-rata curah hujan minimum (yaitu 2.115 mm atau 0,002115 m) dilakukan perhitungan nilai potensi air hujan adalah sebagai berikut:

$$V_{potensi\ hujan} = A_{catchment} \times Curah\ Hujan$$

$$V_{potensi\ hujan} = (1.685.100\ m^2 \times 70\%) \times 2,115\ m$$

$$V_{potensi\ hujan} = 2.494.790\ m^3/tahun$$

Dengan nilai tersebut dan diasumsikan *rainwater loss* sebanyak 80% akibat penguapan hingga kebocoran sehingga besar air hujan terpanen adalah 20%, maka perhitungan volume air hujan terpanen adalah sebagai berikut:

$$V_{hujan\ terpanen} = \%_{terpanen} \times V_{potensi\ hujan}$$

$$V_{hujan\ terpanen} = 20\% \times 2.494.790\ m^3/tahun$$

$$V_{hujan\ terpanen} = 498.968\ m^3/tahun \approx 0,016\ m^3/detik \approx 16\ L/detik$$

Diperoleh besar volume hujan terpanen untuk kawasan Sub-BWP 1 adalah 16 L/detik atau setara dengan 1.382.400 L/hari. Jika diasumsikan kondisi paling intensif dimana hujan terjadi selama 24 jam, maka dapat diperoleh besar volume hujan terpanen per meter persegi atap (V_{hta}) adalah sebagai berikut:

$$V_{hta} = \frac{V_{hujan\ terpanen}}{Luas\ atap}$$

$$V_{hta} = \frac{1.382.400\ L}{1.179.570\ m^2}$$

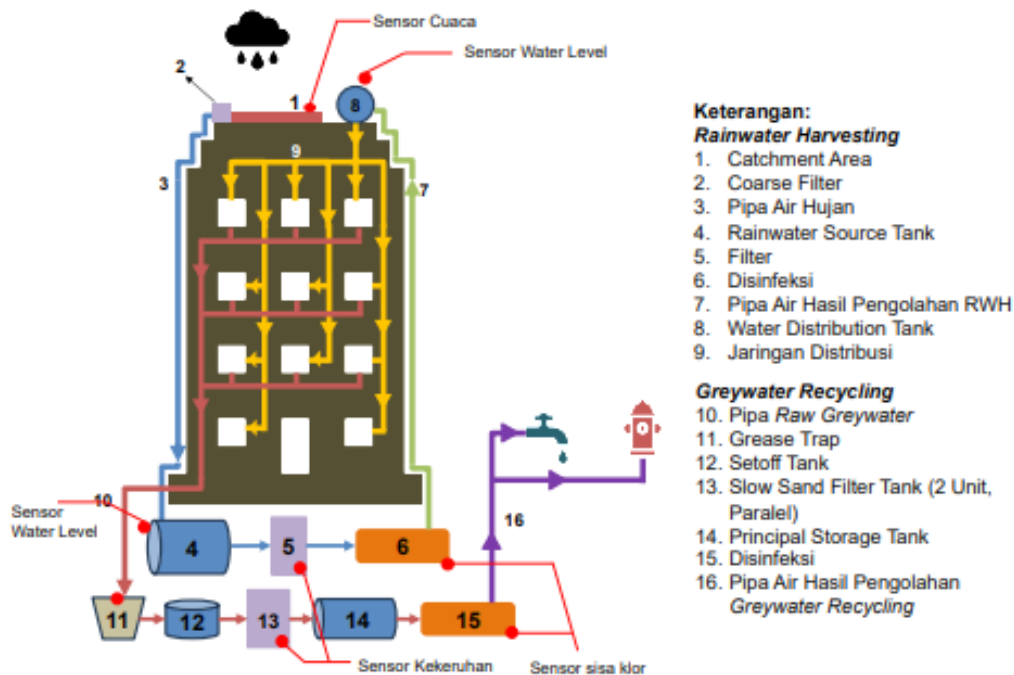
$$V_{hta} = 1,172\ L/m^2$$

Nilai V_{hta} sebesar 1,172 L/m² dapat dipergunakan untuk mengestimasi nilai volume hujan yang dapat ditampung per gedung ketika hujan turun. Dengan nilai tersebut, dapat diestimasi terkait besaran tangki penampungan air hujan yang dibutuhkan.

Berdasarkan dokumen RIT, kebutuhan air minum untuk KIPP fase 1 adalah 124 L/detik. Dalam dokumen Pembaruan Konsep dan BED Air Limbah tahun 2022 disebutkan bahwa konsumsi air domestik di KIPP adalah 150 liter/orang/hari (sesuai yang tercantum pada UDD dan *Masterplan* Bappenas) dengan konsumsi air non domestik adalah sebesar 30% dari nilai tersebut (yaitu 120 liter/orang/hari). Adapun hasil perhitungan estimasi terkait *rainwater harvesting* membutuhkan pedoman lebih lanjut guna menghasilkan estimasi yang lebih spesifik.

4.4.2 Parameter dan Jenis Sensor

Beberapa parameter yang dapat diukur dengan menggunakan sensor adalah: presipitasi, water level, kekeruhan, dan sisa klor. Sedangkan, pemantauan kualitas hasil olahan air hujan dan *greywater* yang mengacu kepada Permenkes No. 2 Tahun 2023 untuk Baku Mutu Hygiene dan Sanitasi dapat dikur di laboratorium. Gambar berikut menunjukkan skema penempatan sensor:



Gambar 58. Skema penempatan sensor pada *rainwater harvesting* dan *greywater recycling*

Penjelasan terkait penempatan sensor untuk masing – masing unit adalah sebagai berikut:

- *Predictive system* cuaca pada *catchment area*.
 Sensor parameter cuaca diletakkan pada *catchment area*. Sensor tersebut dapat mengukur Suhu udara, presipitasi, *Barometric pressure*, *Relative humidity*, *Vapor pressure*, *Wind speed*). Dalam upaya otomatisasi sistem *rainwater harvesting*, implementasi teknologi “RainGrid Stormwater Smartgrid” dapat dilakukan pada kawasan tersebut. Secara garis besar, sistem akan mengambil data historis cuaca kawasan dari BMKG dan dikombinasikan dengan data dari sensor suhu, tekanan barometrik, persipitasi, kapasitas tangki. Dengan menggunakan AI, sistem akan menerjemahkan dan mempelajari data tersebut untuk menghasilkan prediksi hujan dalam lima hari kedepan. Sistem kemudian mengkorelasikan intensitas curah hujan dengan luas permukaan dan kapasitas tangki. Sehingga, sistem dapat mengosongkan tangki secara otomatis sebelum hujan turun agar dapat menampung air hujan secara optimal (*predictive system*).
- Pengukuran *water level* pada *rainwater source tank* dan *water distribution tank*
 Pengukuran *water level* pada *storage tank* ini akan berkaitan dengan operasional pompa. Apabila *water level* pada unit tersebut melebihi batas maksimum, maka pompa akan secara otomatis dimatikan sehingga tidak ada air hujan yang mengalir ke *storage tank*.

- Pengukuran kekeruhan pada unit filtrasi
Kekeruhan merupakan salah satu parameter yang mempengaruhi kinerja unit filtrasi, sehingga diperlukan pengukuran kekeruhan secara berkala. Apabila nilai kekeruhan yang terbaca pada sensor melebihi batas operasional, maka perlu dilakukan *backwash* baik secara otomatis maupun dengan pembersihan manual.
- Pengukuran sisa klor pada unit disinfeksi
Penempatan sensor sisa klor pada unit disinfeksi bertujuan untuk mengetahui apakah dosis klor yang diberikan telah sesuai. Apabila pembacaan sisa klor kurang dari batas minimal, maka perlu ditambahkan klorin baik secara otomatis maupun manual.
- Parameter hasil olahan
Parameter hasil olahan dapat diukur di laboratorium. Mengacu kepada Permenkes No. 2 Tahun 2023 untuk Baku Mutu Hygiene dan Sanitasi, parameter yang dapat diukur adalah temperatur, TDS, kekeruhan, warna, bau, pH, nitrat terlarut, nitrit terlarut, besi terlarut, mangan terlarut, Kromium heksavalen, total coliform, dan *E. coli*. Selain itu, WHO juga merekomendasikan beberapa tambahan parameter yang dapat diukur, yaitu residu disinfeksi, *disinfection byproducts*, tekanan hidrolis, dan mikrobiologi (alga, racun alga, dan metabolit serta bakteri heterofilik) (Tabel 9).

Adapun sistem intervensi untuk masing – masing sensor dirangkum pada Tabel 30 berikut.

Tabel 29 Argumentasi Sensor yang Direkomendasikan dan Sistem Intervensinya (*Greywater Recycling dan Rainwater Harvesting*)

No.	Lokasi	Sensor	Argumentasi sensor	Sistem intervensi otomatis
1	Tangki <i>Rainwater Source</i> dan <i>Water Distribution Tank</i>	<i>Water Level</i>	Sensor untuk otomasi sistem pompa dan <i>rainwater discharge</i>	Water level > ambang batas muka air → pompa berhenti alirkan air ke tangki, lakukan <i>rainwater discharge</i>
2	Efluen Unit Filtrasi	Kekeruhan	Sensor untuk mengetahui kondisi filter	Kekeruhan melebihi batas operasional → pembersihan filter
3	Efluen Unit Disinfeksi	Sisa Klor	Sensor untuk mengetahui kadarklor yang diberikan telah sesuai	Sisa klor kurang dari batas minimum → penambahan klor

4.4.3 Opsi Implementasi

Opsi implementasi untuk pemantauan kualitas hasil olahan air hujan dan *greywater* dibagi menjadi dua, yaitu opsi minimum dan optimum (Tabel 31).

Tabel 30 Implementasi pemantauan kualitas hasil olahan air hujan dan *greywater*

	Opsi Minimum	Opsi Optimum
Lokasi penempatan sensor	<ul style="list-style-type: none"> • Unit filtrasi • Unit disinfeksi • <i>Rainwater storage tank</i> dan <i>water distribution tank</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Predictive system</i> pada <i>catchment area</i> • Unit filtrasi • Unit disinfeksi • <i>Rainwater storage tank</i> dan <i>water distribution tank</i> • Efluent hasil olahan air hujan dan <i>Greywater</i>
Parameter	<ul style="list-style-type: none"> • Unit filtrasi → sensor kekeruhan • Unit disinfeksi → sensor sisa klor • <i>Rainwater storage tank</i> dan <i>water distribution tank</i> → sensor water level 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Catchment area</i> → <i>predictive system</i> • Unit filtrasi → sensor kekeruhan • Unit disinfeksi → sensor sisa klor • <i>Rainwater storage tank</i> dan <i>water distribution tank</i> → sensor water level • Efluent hasil olahan air hujan dan <i>greywater</i> → temperatur, konduktivitas, kekeruhan, pH, dan total coliform
Sensor	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor Kualitas Air (syarat minimum) <ul style="list-style-type: none"> o Kekeruhan (0-40 NTU atau 40-400 NTU) o Sisa klor (0-20 mg/L) 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor Kualitas Air (syarat minimum) <ul style="list-style-type: none"> o Konduktivitas (0-5.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) o Kekeruhan (0-40 NTU atau 40-400 NTU) o Temperatur: -5 hingga 50°C o pH: 0-14 o DO: 0-20 mg/L o Sisa klor (0-20 mg/L) o Koliform: >1 count/100 mL (CFU/100 mL) • Sensor Cuaca (syarat minimum) <ul style="list-style-type: none"> o Suhu udara: -50 – 60 C o Presipitasi: 0-196 mm/h o <i>Barometric pressure</i>: 50-11- kPa o <i>Relative humidity</i>: 0-100%RH o <i>Vapor pressure</i>: 0-47 kPa o <i>Wind speed</i>: 0-30 m/s

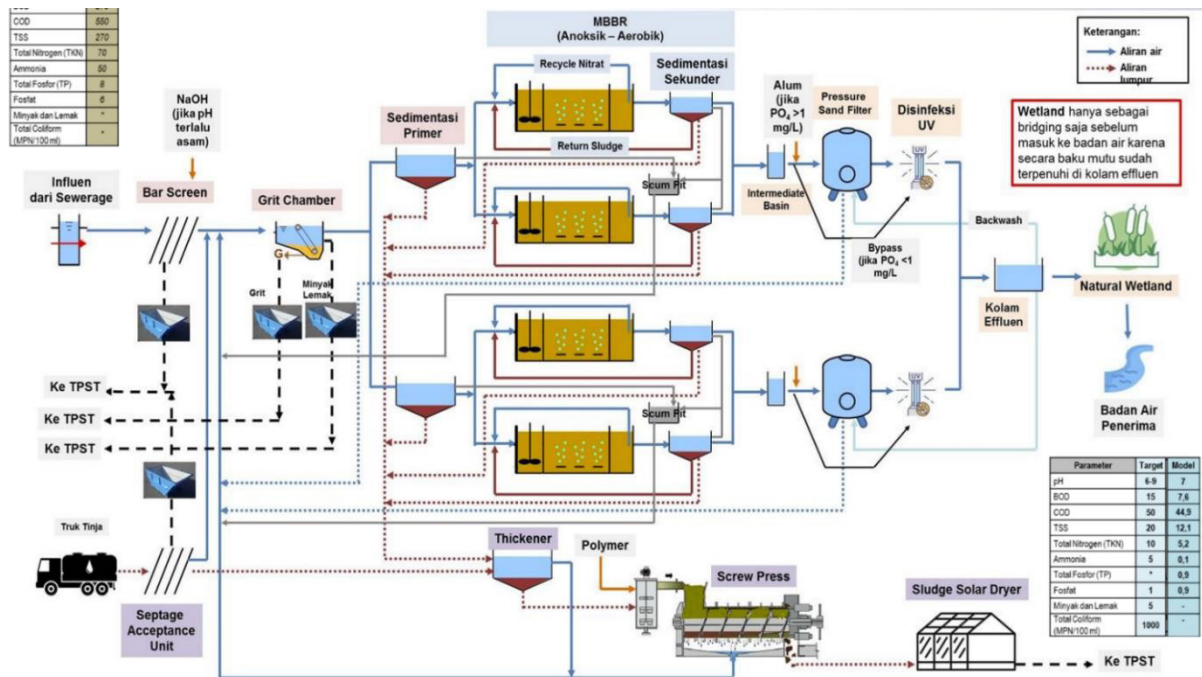
4.5 Pengolahan Air Limbah pada Instalasi Pengolahan Air Limbah Domestik

4.5.1 Skema pengolahan air limbah di IPALD

Dalam dokumen Pembaruan Konsep dan BED Air Limbah tahun 2022 milik Kementerian PUPR, dijelaskan bahwa IPAL untuk Sub BWP-1 akan dibangun dengan menggunakan teknologi MBBR. Lumpur hasil proses IPAL nantinya akan diolah menggunakan biodigester dan menghasilkan gas metana yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber tenaga untuk pembangkit listrik. Digunakan proses *anaerobic-anoxic-aerobic* dalam operasional IPAL dengan tujuan agar dapat menyisahkan nitrogen dan fosfor. Air hasil olahan IPAL nantinya dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan *non-potable water*. Dokumen tersebut mendetailkan pula terkait opsi dan implementasi teknologi lainnya yang bisa diperkenalkan pada tahap desain dan Pembangunan, yaitu:

1. Teknologi IPALD alternatif dengan kinerja lebih baik dan OPEX kompetitif (e.g., *aerobic granulated sludge* atau fotobioreaktor)
2. Pengolahan *side stream* dengan proses *annamox* akan membutuhkan *anaerobic digester* (AD) yang selama desain dasar tidak dianggap karena akan memerlukan *footprint* signifikan. Jika pengolahan bisa dioptimalkan untuk menempatkan AD, maka pengenalan *annamox* bermanfaat untuk konsumsi energi dan penghilangan nitrogen
3. Disinfeksi mempertimbangkan risiko terbentuknya karsinogenik pada efluen (e.g., THM)

Lebih lanjut, dalam dokumen “Dokumentasi Perencanaan PI IKN Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Kawasan Inti Pusat Pemerintahan, September 2023” milik Kementerian PUPR, dijelaskan bahwa konsep MBBR tersebut diterapkan dalam desain IPAL 1, 2, dan 3 yang terintegrasi dengan jaringan perpipaan air limbah kawasan serta TPST. Kapasitas pentahapan untuk masing-masing IPAL adalah 5.000 m³/hari (IPAL 1 dan 3) dan 10.000 m³/hari (IPAL 2). Setiap IPAL memiliki area pelayanannya masing-masing dengan IPAL 1 pada tahap awal akan melayani Gedung Istana dan Kantor Presiden, Sekretariat Presiden, Gedung Kemenko 3 dan 4, Istana Wakil Presiden, dan Rumah Tapak Jabatan Menteri yang memiliki estimasi timbulan air limbah minimum sebesar 750 m³/hari di tahun 2024. Adapun IPAL 2 pada tahap awal akan melayani Gedung Kemenko I dan 2, Gedung Sekretariat Negara, hingga Hunian Pekerja Konstruksi yang memiliki estimasi timbulan air limbah minimum sebesar 1.974 m³/hari untuk seluruhnya di tahun 2024. Sedangkan IPAL 3 pada tahap awal akan melayani 12 Rumah Tapak Jabatan Menteri dan Masjid Negara dengan estimasi timbulan air limbah minimum adalah 415 m³/hari. Skema sistem pengolahan diilustrasikan sebagai berikut:

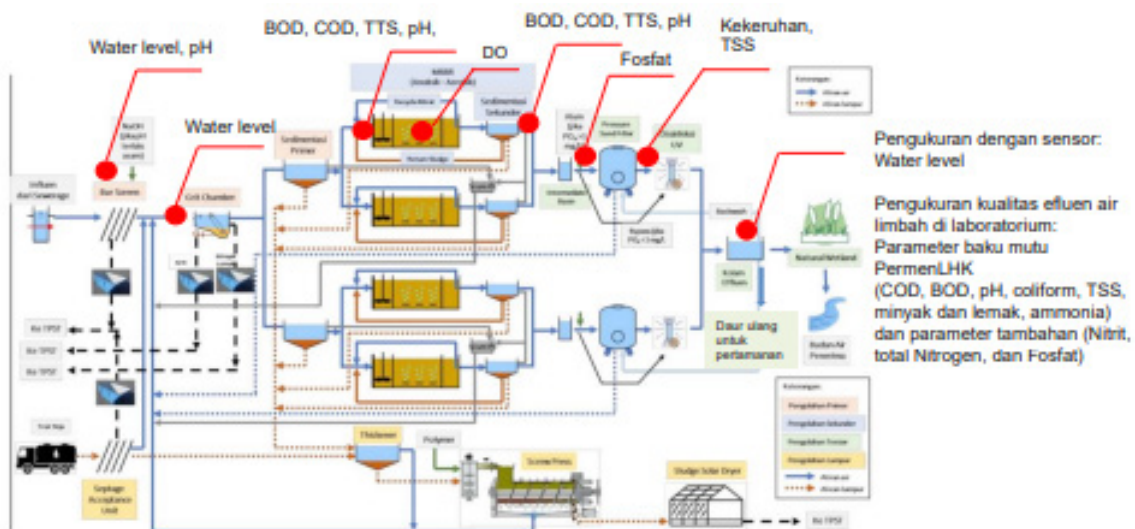


Gambar 59. Skema Proses Sistem IPAL Domestik 1, 2, dan 3 KIPP

Sumber: Dokumentasi Perencanaan PI IKN Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Kawasan Inti Pusat Pemerintahan, 2023

4.5.2 Skema Penempatan Sensor

Parameter pemantauan kualitas hasil olahan air limbah mengacu pada PermenLHK No. 68 Tahun 2016 tentang baku mutu air limbah domestik. Selain itu, parameter operasional unit pengolahan biologis mengacu kepada PermenPUPR No. 4 Tahun 2017 Lampiran IV tentang Pengoperasian, Pemeliharaan, dan Rehabilitasi. Skema penempatan sensor ditunjukkan pada Gambar 61.



Gambar 60. Skema penempatan sensor pada IPAL Domestik

Penjelasan terkait penempatan sensor untuk masing – masing unit adalah sebagai berikut:

- Pengukuran water level dan pH pada unit *bar screen* atau bak ekualisasi.
Secara umum, pengolahan biologis akan bekerja secara optimum pada rentang pH 6–9. Sehingga, diperlukan pengukuran pH secara rutin pada unit *bar screen* sebelum masuk ke unit pengolahan biologis. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan sensor pH agar memudahkan pengukuran secara rutin. Jika pembacaan pH pada sensor menunjukkan <6 , maka sistem perlu memberikan notifikasi untuk memberikan Basa seperti NaOH. Sedangkan, jika pembacaan pH pada sensor menunjukkan >9 , maka sistem perlu memberikan notifikasi untuk memberikan Asam, seperti H₃PO₄. Selain itu, peletakkan sensor water level akan berkaitan dengan pembersihan bar screen dan operasional pompa ekualisasi.
- Pengukuran water level pada unit grit chamber
Pengukuran water level pada unit grit chamber bertujuan untuk mengukur kadar grit atau pasir yang mengendap pada dasar unit. Apabila pembacaan *water level* sudah melebihi kapasitas unit, maka perlu dilakukan pembersihan grit/pasir.
- Pengukuran DO pada unit MBBR
Secara umum, pengolahan biologis akan berjalan optimum apabila kadar oksigen mencukupi. Sehingga, perlu dilakukan pengukuran DO secara berkala dengan menggunakan sensor DO. Apabila pembacaan DO pada sensor < 2 mg/L, maka blower pada kondisi *standby* perlu dinyalakan. Sedangkan apabila pembacaan DO pada sensor
> 3 mg/L, maka blower pada kondisi *standby* perlu dimatikan dan cukup satu blower yang dinyalakan.
- Pengukuran BOD, COD, TSS, pH pada influen dan effluen pengolahan biologis.
Menurut PermenPUPR No. 4 Tahun 2017 Lampiran IV tentang Pengoperasian, Pemeliharaan, dan Rehabilitasi, pengukuran BOD, COD, TSS, dan pH pada influen pengolahan biologis dianjurkan untuk diukur setiap hari. Selain itu, pengukuran juga dianjurkan dilakukan di effluen untuk mengetahui kondisi *overloading*. Oleh karena itu, untuk memudahkan pengukuran secara berkala, maka perlu dilakukan pengukuran otomatis dengan menggunakan sensor BOD, COD, TSS, dan pH. Apabila terjadi kondisi *overloading*, maka perlu dilakukan pemeriksaan rasio F/M untuk memeriksa apakah rasio kebutuhan mikroorganisme di dalam unit sudah sesuai atau masih kurang. Selain itu, apabila nilai rasio BOD/COD $< 0,4$, intervensi yang perlu dilakukan adalah memberi koagulan pada inlet primary clarifier.
- Pengukuran fosfor (PO₄) pada influen *pressured sand filter*
Pengukuran fosfor dilakukan secara berkala dengan menggunakan sensor untuk menentukan kebutuhan alum. Apabila kadar fosfor nya tinggi, maka perlu ditambahkan

alum agar fosfor dapat membentuk flok dan tersisihkan pada unit *pressured sand filter*. Jika pembacaan fosfor pada sensor adalah > 1 mg/L, maka sistem perlu memberikan notifikasi untuk memberikan alum.

- Pengukuran kekeruhan dan TSS pada efluen *pressured sand filter*

Kekeruhan merupakan salah satu parameter yang dapat mempengaruhi proses disinfeksi dengan menggunakan UV. Selain kekeruhan, nilai TSS juga berpengaruh terhadap efektivitas UV dalam melakukan disinfeksi. Nilai kekeruhan dari influen unit disinfeksi yang menggunakan metode sinar UV adalah < 5 NTU, sedangkan nilai TSS adalah sebesar $< 5-10$ mg/L (Qasim & Zhu, 2018). Apabila kekeruhan ≥ 5 NTU dan TSS > 10 mg/L, maka kinerja UV akan terganggu. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengukuran kekeruhan dan TSS secara berkala dengan menggunakan sensor. Apabila pembacaan kekeruhan > 5 NTU dan TSS > 10 mg/L, maka sistem perlu memberi notifikasi untuk melakukan *backwash* pada unit *pressured sand filter*.

- Pengukuran water level di efluen

Hasil pembacaan water level dengan sensor akan berkaitan dengan operasional pompa efluen. Apabila *water level* pada tangki efluen telah melebihi batas maksimum kapasitas, maka sensor akan mengirimkan notifikasi ke sistem untuk menjalankan pompa untuk mengalirkan air olahan IPAL ke badan air. Ketika *water level* pada batas minimum kapasitas tangki efluen, maka sensor akan mengirimkan notifikasi ke sistem untuk menghentikan operasional pompa.

- Pengukuran kualitas air limbah pada efluen

Pada PermenLHK No. 68 Tahun 2016, disebutkan bahwa pengujian kualitas air limbah perlu dilakukan satu bulan sekali dan dilaporkan ke Pemerintah setempat setiap tiga bulan sekali. Parameter yang masuk ke dalam baku mutu air limbah adalah COD, BOD, pH, coliform, TSS, minyak dan lemak, ammonia. Terdapat beberapa tambahan parameter pemantauan yang direncanakan akan digunakan untuk memantau kualitas efluen IPAL di IKN, seperti Nitrit, Total Nitrogen, dan Fosfat. Karena pengukuran parameter - parameter tersebut tidak disyaratkan secara berkala, maka pengujian kualitas air limbah pada efluen dapat dilakukan di laboratorium. Selanjutnya, apabila terdapat rencana untuk daur ulang, maka perlu juga dilakukan pengujian parameter megacu kepada Permenkes No. 2 Tahun 2023 untuk baku mutu hygiene dan sanitasi. Parameter – parameter tersebut adalah pH, total coliform, nitrit, nitrat, konduktivitas, kekeruhan, dan suhu, dan dapat dilakukan di laboratorium. Namun, dalam jangka panjang, pengukuran parameter di efluen dapat dilakukan dengan menggunakan sensor.

Sistem intervensi untuk masing – masing sensor dirangkum pada Tabel 32. Sedangkan, algoritma intervensi pembacaan sensor dapat dilihat pada Lampiran.

Tabel 31 Argumentasi sensor yang direkomendasikan dan sistem intervensinya.

No.	Lokasi	Sensor	Argumentasi sensor	Sistem intervensi otomatis
1	Bar Screen atau Bak Ekualisasi	pH	Sensor pH untuk menjaga kondisi influen dapat diolah oleh MBBR	pH < 6 → Dosing basa pH > 9 → Dosing asam
2	Bar Screen dan Grit Chamber	Water Level	Sensor untuk mengetahui kapan unit perlu dilakukan pembersihan	Water level > ambang batas muka air → pembersihan unit
3	Unit Bak Aerasi (MBBR)	Dissolved Oxygen (DO)	Sensor untuk mengetahui kadar oksigen terlarut untuk menjaga bakteri tetap hidup	DO < 2 mg/L atau antara 2-3 mg/L → blower tambahan dihidupkan DO > 3 mg/L → blower tambahan standby
4	Influen dan Efluen Pengolahan Biologis	BOD dan COD	Sensor untuk mengetahui kondisi <i>overloading</i> dan pemantauan rutin sesuai regulasi	Rasio BOD/COD < 0,4 injeksi koagulan di inlet <i>primary clarifier</i>
		pH dan TSS	Sensor untuk pemantauan rutin sesuai regulasi	Perekaman data
5	Influen Pressured Sand Filtration (Unit Filtrasi)	Fosfor (PO ₄)	Sensor untuk menentukan kebutuhan alum	PO ₄ > 1 mg/L → penambahan alum
6	Efluen Pressured Sand Filtration (Unit Filtrasi)	Kekeruhan dan TSS	Sensor untuk mengetahui kondisi filter dan perintah <i>backwash</i> filter agar UV efektif	Kekeruhan > 5 NTU, TSS > 10 mg/L → <i>backwash</i> filter
7	Efluen IPAL	Kualitas efluen	Sensor untuk pemantauan rutin sesuai regulasi (COD, BOD, pH, coliform, TSS, minyak dan lemak, ammonia, Nitrit, Total Nitrogen, dan Fosfat)	Perekaman data

4.5.3 Opsi Implementasi

Opsi implementasi untuk pemantauan kualitas air limbah dibagi menjadi dua, yaitu opsi minimum dan optimum (Tabel 33).

Tabel 32 Opsi Implementasi Pemantauan Kualitas Air Limbah

	Opsi Minimum	Opsi Optimum
Lokasi penempatan sensor	<ul style="list-style-type: none"> • Bar Screen • Grit chamber • MBBR • Influen dan efluen MBBR • Influen dan efluen <i>pressured sand filter</i> • Efluen (hanya untuk sensor water level) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bar Screen • Grit chamber • MBBR • Influen dan efluen MBBR • Influen dan efluen <i>pressured sand filter</i> • Efluen (untuk sensor water level dan sensor parameter kualitas air limbah dan air daur ulang)
Parameter	<ul style="list-style-type: none"> • Bar Screen → water level, pH • Grit chamber → water level • MBBR → DO • Influen dan efluen pengolahan biologis → BOD, COD, TSS, pH • Influen <i>pressured sand filter</i> → Fosfor • Efluen <i>pressured sand filter</i> → Kekeruhan • Efluen IPALD → water level 	<ul style="list-style-type: none"> • Bar Screen → water level, pH • Grit chamber → water level • MBBR → DO • Influen dan efluen pengolahan biologis → BOD, COD, TSS, pH • Influen <i>pressured sand filter</i> → Fosfor • Efluen <i>pressured sand filter</i> → Kekeruhan • Efluen IPALD → water level, parameter kualitas air limbah (COD, BOD, pH, coliform, TSS, minyak dan lemak, ammonia, Nitrit, total Nitrogen, dan Fosfat), dan kualitas air daur ulang (pH, total coliform, nitrit, nitrat, konduktivitas, kekeruhan, dan suhu)
Sensor	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor Kualitas Air (syarat minimum) <ul style="list-style-type: none"> o BOD (0-2.000 mg/L) o COD (0-4.000 mg/L) o TSS (0-500 mg/L) o Fosfor (0.02- 15.00mg/l PO4-P) o Kekeruhan (0-40 NTU atau 40-400 NTU) o pH: 0-14 o DO: 0-20 mg/L 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor Kualitas Air (syarat minimum) <ul style="list-style-type: none"> o BOD (0-2.000 mg/L) o COD (0-4.000 mg/L) o TSS (0-500 mg/L) o Fosfor (0.02- 15.00 mg/l PO4-P) o Kekeruhan (0-40 NTU atau 40-400 NTU) o Suhu: -5 hingga 50°C o pH: 0-14 o DO: 0-20 mg/L o Koliform: >1 count/100 mL (CFU/100 mL) o Minyak dan lemak o Amonia (0-100 mg/L sebagai nitrogen)

	Opsi Minimum	Opsi Optimum
		<ul style="list-style-type: none"> o Nitrit (0-25mg/L) o Total Nitrogen (0.5~100 mg/L) o Konduktivitas (10 μS/cm - 5000 μS/cm)
Catatan	<ul style="list-style-type: none"> • Parameter – parameter yang diukur dengan sensor pada opsi ini merupakan parameter operasional yang perlu diuji secara berkala. Parameter operasional ini berkaitan dengan kinerja unit IPALD. • Pengujian parameter kualitas air limbah dapat diuji di laboratorium karena tidak dipersyaratkan untuk diuji secara berkala. 	<ul style="list-style-type: none"> • Seluruh parameter, baik parameter operasional maupun parameter kualitas air limbah diuji dengan menggunakan sensor. Namun, tantangannya adalah biaya investasinya akan menjadi lebih besar.

BAB V

KESIMPULAN

Pedoman smart water dan smart wastewater management disusun berdasarkan studi literatur dan implementasi dilapangan. Pada pedoman ini, 2 alternatif rekomendasi dijabarkan dalam tahapan jangka pendek / kondisi minimum dan jangka panjang / kondisi optimum serta rekomendasi tindak lanjut hasil deteksi sensor yang terintegrasi dengan sistem intervensi otomatis untuk mewujudkan sistem pengolahan air cerdas dan berkelanjutan. Berdasarkan hasil pedoman maka dapat diambil kesimpulan:

1. Pengolahan Air Minum

Hasil pedoman menunjukkan bahwa 15 dari 19 parameter wajib kualitas air minum yaitu E. Coli, Total Coli, Suhu, TDS, Kekeruhan, Warna, Bau, pH, Nitrat, Nitrit, Kromium hexavalent, Besi, Mangan, Sisa klor, dan Fluoride sudah tersedia alat deteksi dalam bentuk sensor. Sistem pada pemantauan instalasi pengolahan air dikategorikan menjadi *direct* dan *Indirect Monitoring*. Pada *Direct monitoring*, sensor dipergunakan untuk memantau setiap unit pengolahan air yang meliputi kualitas dari unit pengolahan maupun kualitas produksi. Pada kondisi lain yaitu *Indirect monitoring*, sensor tidak hanya dipergunakan sebagai pemantauan. Sensor diintegrasikan dengan *event detection system* yang berfungsi untuk melakukan intervensi secara otomatis apabila kualitas air pada proses pengolahan berada diatas yang ditentukan. Hal ini bertujuan untuk mewujudkan sistem pengolahan air cerdas yang berkelanjutan.

2. Jaringan Transmisi dan Distribusi

Pemantauan pada jaringan transmisi dan distribusi pada air bersih menitikberatkan pada parameter kuantitatif (perubahan tekanan atau debit aliran) dibandingkan dengan kualitatif (*biofouling*). Pemanfaatan IoT pada jaringan transmisi dan distribusi dapat berupa analisa statistik kuantitas dan kualitas air, prediksi penggunaan air, deteksi kontaminasi jaringan yang diakibatkan oleh mikroorganisme dan deteksi kebocoran pada sistem transmisi ataupun distribusi. Spesifik terhadap jaringan distribusi, sistem pemantauan berbasis distrik area dengan pemantauan parameter kualitatif minimum (Kekeruhan, pH, suhu, TDS, dan residu Klorin)

3. *Rainwater harvesting* dan *Greywater Recycling*

Penggunaan sumber air alternatif pada bangunan gedung telah menjadi aspek yang menjadi perhatian dalam pembangunan gedung di kawasan IKN. Untuk mengurangi konsumsi air bersih dalam memenuhi kebutuhan non-potable pada bangunan, maka air hujan, melalui proses *rainwater harvesting*, menjadi opsi yang signifikan. Integrasi skema *rainwater harvesting* dengan *greywater recycling* memungkinkan hasil olahan air hujan dan greywater digunakan untuk keperluan *non-potable*, seperti toilet *flushing*, pertamanan, dan hidran. Berdasarkan literatur, otomasi dapat diimplementasikan dengan memanfaatkan *predictive system* (misal “*RainGrid Stormwater Smartgrid*”). Sistem ini mampu melakukan pengosongan tangki secara otomatis, berdasarkan prediksi curah hujan untuk periode lima hari ke depan. Selain itu, pedoman ini juga merekomendasikan penerapan sensor kualitas air, seperti sensor kekeruhan dan sisa klor, untuk memastikan kualitas air yang sesuai standar.

4. Pengolahan Air Limbah

Pengolahan air limbah di IKN dilakukan melalui sistem terpusat pada IPAL dengan menerapkan teknologi MBBR. Berdasarkan PermenPUPR No. 4 Tahun 2017, Lampiran IV tentang Pengoperasian, Pemeliharaan, dan Rehabilitasi IPAL, disarankan untuk melakukan pemantauan harian terhadap beberapa parameter pada inlet dan outlet unit pengolahan biologis. Untuk memudahkan pemantauan berkala terhadap kualitas air limbah, penggunaan smart sensor dianggap sebagai solusi yang efektif. Pedoman ini merekomendasikan penerapan sensor water level, pH, DO, BOD, COD, TSS, Fosfat, dan Kekeruhan di beberapa unit pengolahan untuk mengevaluasi dan mengoptimalkan kinerja IPAL. Hasil deteksi sensor kemudian akan diintegrasikan dengan sistem intervensi otomatis untuk mewujudkan sistem pengolahan air limbah cerdas dan berkelanjutan.

BAB VI

PENUTUP

Perkembangan teknologi informasi dan sensor mendorong pergeseran metode pemantauan operasional dan kualitas air produksi baik pada sistem distribusi dan Instalasi Pengolahan Air (IPA) bersih ataupun limbah beralih dari basis uji laboratorium menjadi sistem deteksi dengan basis penggunaan smart sensor (*Smart Water Management System*). Sistem *Smart Water Management System* berbasis SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) tidak terbatas terkait penggunaan sensor tetapi juga aktuator dan perangkat terkoneksi internet (*Internet of Think, IoT*). SCADA berfungsi untuk mengumpulkan data dari sensor dan menganalisisnya secara real-time. Pada aspek pemantauan kinerja IPA, aplikasi sensor sangat krusial untuk mendeteksi kontaminasi atau kegagalan sistem dan merekam data kinerja proses pengolahan untuk evaluasi dan optimasi. Analisis juga dapat menggunakan algoritma yang sesuai, seperti algoritma *Machine Learning* dan *Artificial Intelligences* untuk memberikan intervensi apabila terjadi permasalahan khususnya pada IPA.

Demikian laporan akhir ini kami susun sebagai hasil dari pekerjaan Pedoman Sistem *Smart Water* dan *Smart Wastewater Management: Pemanfaatan Teknologi Cerdas dalam Pengelolaan Air Bersih dan Air Limbah Untuk Ibu Kota Nusantara (IKN)*. Terima kasih atas segala kepercayaan dan kesempatan yang Deputi Transformasi Hijau dan Digital, Otorita Ibu Kota Nusantara berikan. Besar harapan kami bahwa hasil pedoman ini dapat memberikan dampak positif dalam perencanaan sistem *Smart Water* dan *Smart Wastewater Management* untuk Ibu Kota Nusantara. Akhir kata, semoga kerja sama kita berjalan lancar hingga membuahkan hasil yang memuaskan.

BAB VII

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, S. N. F., Ismail, A., Juahir, H., Ahmad, R. B., Lananan, F., Hashim, N. M., Ariffin, N., Zali, M. A., Mohd, T. A. T., Hussin, M. H. F., Mahmood, R. I. S. R., Jamil, J. R. A., & Desa, S. M. (2022). Chemical composition of rainwater harvested in East Malaysia. *Environmental Engineering Research*, 27(2), 0–2. <https://doi.org/10.4491/eer.2020.508>
- Adams, M. N., & Jokonya, O. (2021). An investigation of smart water meter adoption factors at universities. *Procedia Computer Science*, 196, 324–331. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.020>
- Atlas Science Environmental Robotic. (2022, August 22). *How Does Dissolved Oxygen Affect Water Quality?*
- Beal, C. D., & Flynn, J. (2015). Toward the digital water age: Survey and case studies of Australian water utility smart-metering programs. *Utilities Policy*, 32, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2014.12.006>
- Bhattacharya, Y., & Nakamura, H. (2023). *Implementing Green Infrastructure for Urban Stormwater Management: A Systematic Review to Identify Future Challenges for Japan*. January. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4358478>
- Boyle, T., Giurco, D., Mukheibir, P., Liu, A., Moy, C., White, S., & Stewart, R. (2013). Intelligent metering for urban water: A review. In *Water (Switzerland)* (Vol. 5, Issue 3, pp. 1052–1081). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/w5031052>
- Campisano, A., Butler, D., Ward, S., Burns, M. J., Friedler, E., DeBusk, K., Fisher-Jeffes, L. N., Ghisi, E., Rahman, A., Furumai, H., & Han, M. (2017). Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives. *Water Research*, 115, 195–209. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.056>
- Chen, Y., & Han, D. (2018). Water quality monitoring in smart city: A pilot project. *Automation in Construction*, 89(June 2017), 307–316. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.008>
- Dominic O'Donnell. (2022, March 21). *SCADA Systems & Applications in Water Treatment Plants*. <https://sensorex.com/scada-systems-applications-water-treatment-plants/>
- Ellison, J. C., Smethurst, P. J., Morrison, B. M., Keast, D., Almeida, A., Taylor, P., Bai, Q., Penton, D. J., & Yu, H. (2019). Real-time river monitoring supports community management of low-flow periods. *Journal of Hydrology*, 572(February), 839–850. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.035>

- Environmental Protection Agency USA. (2009). Distribution System Water Quality Monitoring: Sensor Technology Evaluation Methodology and Results. *A Guide for Sensor Manufacturers and Water Utilities*, 1–60. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/distribution_system_water_quality_monitoring_sensor_technology_evaluation_methodology_results.pdf
- Geetha, S., & Gouthami, S. (2016). Internet of things enabled real time water quality monitoring system. *Smart Water*, 2(1), 1–19. <https://doi.org/10.1186/s40713-017-0005-y>
- Gómez-Monsalve, M., Domínguez, I. C., Yan, X., Ward, S., & Oviedo-Ocaña, E. R. (2022). Environmental performance of a hybrid rainwater harvesting and greywater reuse system: A case study on a high water consumption household in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 345(February). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131125>
- Han, M. (2020). The success story of multi-purpose rainwater management system at Star City, Korea : Design, climate change adaptation potential and philosophy. In C. A. C. Flores, J. A. G. Espíndola, M. R. P. Montes, & R. Pacheco-Vega (Eds.), *International Rainwater Catchment Systems Experiences: Towards Water Security* (pp. 171–177). IWA Publishing.
- Hasan, N. Y., Drijana, Sulaeman, A., & Ariesyady, H. D. (2019). Water quality indices for rainwater quality assessment in Bandung urban region. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 669(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/669/1/012044>
- Humoreanu, B., & Nascu, I. (2012). Wastewater treatment plant SCADA application. *2012 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, AQTR 2012 - Proceedings*, 575–580. <https://doi.org/10.1109/AQTR.2012.6237776>
- Indonesia Industrial Part. (2009). *Jenis Flow Meter Untuk Pengukuran Air Limbah*. Pemahaman Electromagnetic Flow Meter. <https://inaparts.com/measurement/artikel-flowmeter/pemahaman-electromagnetic-flow-meter/>
- SMART WATER MANAGEMENT Case Study Report Acknowledgements, (2018).
- Juan, Y. K., Chen, Y., & Lin, J. M. (2016). Greywater reuse system design and economic analysis for residential buildings in Taiwan. *Water (Switzerland)*, 8(11). <https://doi.org/10.3390/w8110546>
- Judeh, T., Shahrour, I., & Comair, F. (2022). Smart Rainwater Harvesting for Sustainable Potable Water Supply in Arid and Semi-Arid Areas. *Sustainability (Switzerland)*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/su14159271>

- Karen Ellis. (2023, October 6). *Understanding Smart Water Meters*. Enhancing Water Management for Cities and Towns with Smart Water Meters and Advanced Metering Infrastructure. [https://www.performanceservices.com/resources/smart-water-meters-smarter-water-management-for-cities-and-towns/#:~:text=Here%20are%20some%20common%20types,\(forward%20and%20reverse%20flow\)](https://www.performanceservices.com/resources/smart-water-meters-smarter-water-management-for-cities-and-towns/#:~:text=Here%20are%20some%20common%20types,(forward%20and%20reverse%20flow)).
- K-Water, & IWRA. (2018). *SMART WATER MANAGEMENT Case Study Report Acknowledgements*.
- Lakho, F. H., Vergote, J., Ihsan-Ul-Haq Khan, H., Depuydt, V., Depreeuw, T., Van Hulle, S.W. H., & Rousseau, D. P. L. (2021). Total value wall: Full scale demonstration of a green wall for grey water treatment and recycling. *Journal of Environmental Management*, 298(May), 113489. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113489>
- Lee, M., Kim, M., Kim, Y., & Han, M. (2017). Consideration of rainwater quality parameters for drinking purposes: A case study in rural Vietnam. *Journal of Environmental Management*, 200(2017), 400–406. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.072>
- Lestari, D. S., Sukamta, & Sari, Y. C. (2023). *Status Kualitas Air DAS Sanggai di Kabupaten Penajam Paser Utara dan Perumusan Strategi Pencegahan serta Pengendalian Pencemaran Air*. 21(4), 914–932. <https://doi.org/10.14710/jil.21.4.914-932>
- Liang, R., di Matteo, M., Maier, H. R., & Thyer, M. A. (2019). Real-time, smart rainwater storage systems: Potential solution to mitigate urban flooding. *Water (Switzerland)*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/W11122428>
- Lim, H. S., & Lu, X. X. (2016). Sustainable urban stormwater management in the tropics: An evaluation of Singapore’s ABC Waters Program. *Journal of Hydrology*, 538, 842–862. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.063>
- March, H., Morote, Á. F., Rico, A. M., & Saurí, D. (2017). Household smart water metering in Spain: Insights from the experience of remote meter reading in alicante. *Sustainability (Switzerland)*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/su9040582>
- Mazurkiewicz, K., Jeż-Walkowiak, J., & Michałkiewicz, M. (2022). Physicochemical and microbiological quality of rainwater harvested in underground retention tanks. *Science of the Total Environment*, 814. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152701>
- Michiru, S. (2023). *Urban Stormwater Management and the Role of Civil Society | Research | The Tokyo Foundation for Policy Research*. The Tokyo Foundation for Policy Research. <https://www.tokyofoundation.org/research/detail.php?id=938>
- Morris, A. S., & Langari, R. (2012). Flow Measurement. In *Measurement and Instrumentation* (pp. 425–459). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381960-4.00016-4>

- Oberascher, M., Rauch, W., & Sitzenfrei, R. (2022). Towards a smart water city: A comprehensive review of applications, data requirements, and communication technologies for integrated management. *Sustainable Cities and Society*, 76(September 2021), 103442. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103442>
- Oh, K. S., Leong, J. Y. C., Poh, P. E., Chong, M. N., & Lau, E. Von. (2018). A review of greywater recycling related issues: Challenges and future prospects in Malaysia. *Journal of Cleaner Production*, 171, 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.267>
- Oren, G., & Stroh, N. Y. (2013). Mathematical Model for Detection of Leakage in Domestic Water Supply Systems by Reading Consumption from an Analogue Water Meter. *International Journal of Environmental Science and Development*, 386–389. <https://doi.org/10.7763/ijesd.2013.v4.377>
- Oviedo-Ocaña, E. R., Dominguez, I., Ward, S., Rivera-Sanchez, M. L., & Zaraza-Peña, J. M. (2018). Financial feasibility of end-user designed rainwater harvesting and greywater reuse systems for high water use households. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(20), 19200–19216. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8710-5>
- Patrick. (2023, February 22). *ORP METER: PENGERTIAN, KEGUNAAN, DAN CARA KERJANYA*. https://www.tanindo.net/orp-meter/#1_Mengetahui_Kelayakan_Air
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig und Berlin. (2019). *WATER METERS*. Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig. https://www.aplmf.org/uploads/5/7/4/7/57472539/c_-_water_meters.pdf
- Preston Marcoux. (2023, June 12). *4 Water Meter Types and Common Water Measurement Devices*. <https://www.lincenergysystems.com/blog/common-water-meter-types/>
- Randall, T., & Koech, R. (2019). SMART WATER METERING TECHNOLOGY FOR WATER MANAGEMENT IN URBAN AREAS. *Water E-Journal*, 4(1), 1–14. <https://doi.org/10.21139/wej.2019.001>
- Singh, S., Rai, S., Singh, P., & Mishra, V. K. (2022). Real-time water quality monitoring of River Ganga (India) using internet of things. *Ecological Informatics*, 71(May), 101770. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101770>
- Suits, K., Annus, I., Kändler, N., Karlsson, T., Maris, A. Van, Kaseva, A., Kotoviča, N., & Rajarao, G. K. (2023). Overview of the (Smart) Stormwater Management around the Baltic Sea. *Water (Switzerland)*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/w15081623>
- Sunil L. Andhare, P. J. P. (2014). SCADA a tool to increase efficiency of water treatment plant. *Asian Journal of Engineering and Technology Innovation* 02, 04.
- The Corporation of the City of Guelph. (2012). *Guelph Residential Greywater Field Test Final Report*.