

PEMILIHAN SISTEM AIR LIMBAH-LUMPUR TINJA KOMUNAL MENGUNAKAN ANALISIS KLUSTER HIERARKI

The System Selection of Communal Wastewater Fecal Sludge Treatment by Hierarchical Cluster

Elis Hastuti¹, Benny Joy², Unang Supratman³

¹Bina Teknik Permukiman dan Perumahan, Direktorat Jenderal Cipta Karya, Kementerian PUPR,
Jalan Panyawungan, Cileunyi Wetan, Kabupaten Bandung 40393

^{2,3} Program Ilmu Lingkungan, Fakultas Pascasarjana, Universitas Padjadjaran,
Jalan Dipatiukur No. 35, Bandung 40132

Surel: ¹elishastuti@pu.go.id, ²joy@unpad.ac.id, ³unang.supratman@unpad.ac.id

Diterima : 28 Desember 2023; Disetujui : 1 April 2024

Abstrak

Pengelolaan lumpur tinja dari instalasi pengolahan air limbah (IPAL) desentralisasi merupakan tantangan di kawasan permukiman yang memiliki keterbatasan akses ke sarana pengolahan lumpur tinja terpusat. Pada tulisan ini, dikaji pemilihan dan strategi pengembangan sistem IPAL komunal dan pengolahan lumpur tinja terintegrasi (SIPAL-LT). Faktor-faktor dominan keberlanjutan pengembangan IPAL menentukan pemilihan SIPAL-LT, yaitu faktor sistem pengolahan, pengelolaan, lingkungan, dan karakteristik masyarakat. Pengembangan IPAL terintegrasi di lokasi studi ditentukan berdasarkan profil keberlanjutan, pilihan teknologi, dan profil pengembangan SIPAL-LT. Pemilihan dan penentuan prioritas pengembangan SIPAL-LT dianalisis dengan metode kluster hierarki, sedangkan strateginya menggunakan analisis kuadran. Pilihan SIPAL-LT dapat dikembangkan pada kluster yang memiliki karakteristik, yaitu air limbah domestik berkategori pencemar rendah-sedang, pengguna IPAL komunal eksisting lebih dari 60% kapasitas, lumpur tinja berkategori pencemar rendah, tingkat pemeliharaan IPAL komunal berkategori rendah-sedang, indeks efektifitas IPAL komunal lebih dari 60%, dan tingkat partisipasi masyarakat berkategori sedang-tinggi. Pilihan SIPAL-LT terbaik berada di lokasi studi yang telah memanfaatkan IPAL komunal teknologi biofilter atau digester anaerobik, sedangkan pengolahan lumpur tinja direncanakan menggunakan sistem constructed wetland atau kombinasi sistem sludge drying bed dan sistem co-composting.

Kata Kunci: Air limbah, lumpur tinja, kluster, teknologi, strategi

Abstract

Management of fecal sludge from decentralized wastewater treatment plants (WWTP) is a challenge in settlements have limited access to centralized sludge treatment facilities. This paper reviewed the selection and development strategy of integrated communal WWTP and fecal sludge treatment (SIPAL-LT). The dominant factors influence sustainability of SIPAL-LT are treatment system, management, environment, and community characteristic. The development of SIPAL-LT were determined based on the sustainability profile of location study, technology selection, and development profile of SIPAL-LT. The selection and priority of SIPAL-LT system were analyzed by hierarchical cluster, while development strategies by quadrants method. The SIPAL-LT that feasible to develop is in a cluster that has characteristic, including domestic wastewater treated categorized low-medium pollution, existing user of communal WWTP more than 60% of capacity, fecal sludge categorized light pollution, maintenance index categorized low- medium, overall effectiveness equipment index of communal WWTP more than 60%, and participation stage categorized medium-high. The best SIPAL-LT in study location has communal WWTP applied biofilter or digester anaerobic technology, while planning of fecal sludge treatment applied constructed wetland or sludge drying bed combined by co-composting.

Keywords: Fecal sludge, wastewater, cluster, technology, strategy

PENDAHULUAN

Keterbatasan pengelolaan infrastruktur air limbah domestik dapat merupakan ancaman terhadap kesehatan masyarakat dan lingkungan. Pengelolaan lumpur tinja sebagai penentu kinerja sarana Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) sering menghadapi permasalahan, terutama di kawasan permukiman dengan akses terbatas ke sarana pengolahan lumpur tinja. Cakupan akses aman infrastruktur air limbah yang masih rendah, yaitu sekitar 10,16% di tahun 2022. Hal ini menjadi tantangan besar untuk mencapai tujuan ke 6.2 *Sustainable Development Goals* (SDGs), yaitu proporsi penduduk menggunakan layanan sanitasi yang dikelola aman. Akses sanitasi aman yang rendah, tidak hanya berpotensi bahaya untuk sumber air, juga dapat meningkatkan krisis sumber daya air, tidak efektifnya irigasi pertanian, dan ancaman kesehatan (Li et al., 2022). Sementara itu, sarana sanitasi yang memiliki kendala penyediaan air bersih terbatas atau tidak dilakukan pengurusan lumpur tinja, dapat meningkatkan konsentrasi polutan air limbah dan umumnya air olahan IPAL dialirkan dalam kondisi septik ke lingkungan (Piasecki, 2019).

Sarana IPAL di kawasan permukiman merupakan komponen pengelolaan air limbah yang sangat penting. Namun, di beberapa kawasan perdesaan atau semi urban, pengembangan sistem sentralisasi terkendala oleh aspek konstruksi dan pola penyebaran permukiman. Pada sistem IPAL desentralisasi, mempunyai kapasitas pengolahan air limbah terbatas baik tingkat rumah tangga dan komunal (Priyambada and Purwono, 2019), atau skala individual, kluster perumahan atau komersial (Kazora and Mourad, 2018). Sistem IPAL komunal secara setempat atau terpusat yang diaplikasikan di Indonesia, pada umumnya untuk pelayanan kelompok masyarakat sekitar 10-100 KK (Brontowiyono et al., 2022).

Pengolahan air limbah menghasilkan lumpur atau lumpur tinja yang terakumulasi pada periode waktu tertentu di sarana pengolahan (Verma, Sengupta, and Anand, 2020). Lumpur tinja dapat sebagai campuran lumpur terolah sebagian (*septage*) dan air limbah, mengandung senyawa organik, nutrien dan virus, bakteri dan/atau parasit dan dapat termasuk tanah, pasir dan sampah rumah tangga (Bao et al., 2020). Menurut Talyer, 2018, lumpur tinja yang telah tersimpan pada periode tertentu, diperlukan pengurusan dan pengolahan lumpur menjadi produk yang tidak membahayakan kesehatan dan lingkungan.

Di kawasan permukiman perdesaan, terutama yang memiliki kepadatan penduduk cukup tinggi, teknologi dan sarana prasarana sudah mulai tumbuh

atau kondisi sosial ekonomi meningkat, di antaranya dapat mengembangkan Desa Peduli Lingkungan (DPL). Terwujudnya SDGs Desa Peduli dapat berkontribusi sebesar 74% terhadap pencapaian SDGs Nasional (Sugito, 2022). Di kawasan DPL, dapat mengembangkan pengelolaan terintegrasi air limbah komunal dan lumpur tinja, untuk menghasilkan kembali sumber daya, baik air olahan dan padatan (Bernal, 2018). Pengembangan sistem air limbah ini berorientasi *resource recovery* dan berdekatan dengan penerima manfaat (Libralato, Volpi Ghirardini, and Avezzù, 2012; Marleni and Raspati, 2020). Pengembangan IPAL komunal terintegrasi diperlukan seiring dengan meningkatnya perencanaan sistem desentralisasi, termasuk IPAL individual sekitarnya seperti tangki septik, cubluk, atau biofilter. Selain itu, terkait pengurusan lumpur yang tidak rutin, banyak sarana IPAL komunal yang kurang dimanfaatkan masyarakat.

Sistem IPAL komunal pada umumnya menggunakan proses pengolahan secara anaerobik atau kombinasi proses pengolahan anaerobik-aerobik. Pengembangan pengolahan lumpur tinja di sarana IPAL komunal ini, dapat dilakukan tersendiri atau kombinasi pengolahan dengan air limbah komunal. Sistem pengolahan lumpur tinja ini memerlukan teknologi pengolahan dan *dewatering* yang terjangkau dan mudah pengoperasian, memenuhi standar pembuangan, atau penggunaan kembali (Strande et al., 2018). Alternatif sistem pengolahan lumpur tinja yang dapat dikelola masyarakat, diantaranya dengan kombinasi pengomposan (*co-composting*) (Thomas, Kranert, and Philip, 2018). Pengolahan lumpur tinja dapat dikombinasikan dengan biomassa lainnya, seperti sampah organik, kotoran hewan, dan sampah pertanian (Mata-Alvarez et al., 2014). Adapun pada IPAL komunal yang beroperasi dibawah kapasitas dapat menerapkan *co-treatment*, antara lain dengan sistem digester anaerobik (Silva et al., 2018), dan penting memperhatikan rasio kapasitas air limbah dan lumpur tinja (Keucken et al., 2018).

Pemilihan teknologi pengolahan lumpur tinja yang tepat diperlukan sebelum pemanfaatan untuk pertanian (*Food Agricultural Organization and Toilet Board Coalition*, 2021). Di dalam perencanaan teknologi tersebut harus memperhatikan karakteristik lokal, termasuk sistem pengolahan, pengelolaan dan penataan lingkungan, serta karakteristik masyarakat (Starkl et al., 2022). Pengelolaan air limbah dan lumpur tinja terintegrasi ini akan menghadapi beberapa tantangan, di antaranya kemudahan pengoperasian atau pemeliharaan, penyedotan terjadwal, biaya pengangkutan, dan pemahaman masyarakat (Conville et al., 2019).

Untuk peningkatan akses air limbah aman di kawasan permukiman yang memiliki keterbatasan akses ke IPLT maka penting mengembangkan sistem terintegrasi air limbah komunal dengan pengelolaan lumpur tinja. Pada tulisan ini, dikaji pemilihan dan penentuan prioritas serta strategi pengembangan sistem IPAL komunal yang terintegrasi dengan pengelolaan lumpur tinja, termasuk lumpur dari IPAL individual sekitarnya. Pemilihan sistem IPAL komunal dan lumpur tinja komunal ini mempertimbangkan kriteria-kriteria kelayakan teknis, lingkungan, dan sosial ekonomi di lokasi permukiman Daerah Aliran Sungai (DAS) Citarum.

METODE

Pengumpulan Data IPAL

Pengumpulan data primer pada penelitian ini, menggunakan metode observasi, meliputi sistem pengolahan air limbah komunal, pengelolaan, kondisi lingkungan, dan pengujian kualitas air limbah dan karakteristik lumpur tinja dari sistem IPAL komunal dan IPAL individual, serta observasi masyarakat di lokasi penelitian. Sementara itu, kajian data sekunder dilakukan untuk analisis data IPAL di permukiman DAS Citarum, meliputi jenis pengolahan, kapasitas IPAL yang dimanfaatkan, kinerja pengolahan, kondisi pengelolaan dan kondisi lingkungan sekitarnya. Data sekunder tersebut diperoleh dari instansi

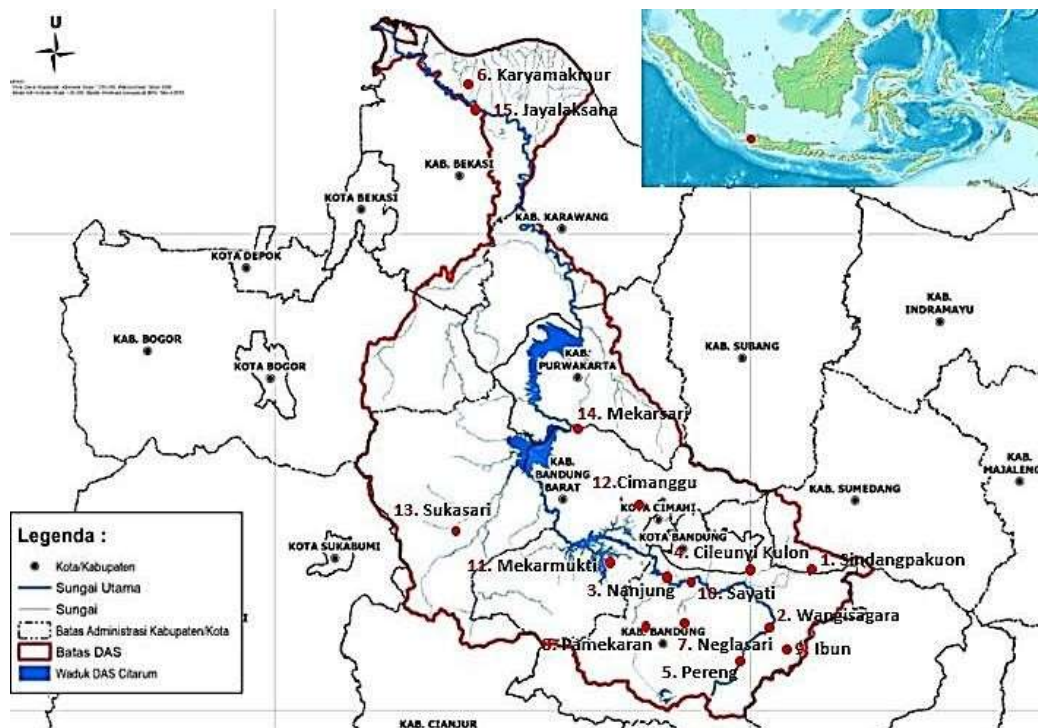
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR), Dinas PUPR, Dinas Lingkungan Hidup, kelurahan atau kecamatan, dan organisasi masyarakat.

Ruang lingkup penelitian, meliputi observasi sistem IPAL komunal yang telah dimanfaatkan masyarakat dan kondisi IPAL individual sekitarnya (radius < 1km dari IPAL komunal) di lokasi studi. Sistem IPAL komunal dan individual dikaji pada tahun 2020-2022. Pemilihan lokasi studi berdasarkan pertimbangan, yaitu masyarakat belum mengelola lumpur tinja, kendala akses ke IPLT, dan terdapat potensi untuk pemanfaatan kembali hasil olahan IPAL komunal untuk pertanian.

Pada studi ini, untuk kecukupan data dalam analisis statistik faktor, menggunakan data IPAL komunal dan kondisi masyarakat serta lingkungan sekitarnya di 15 lokasi studi (Gambar 1). Sementara itu, perencanaan sistem IPAL komunal dan lumpur tinja terintegrasi akan difokuskan di lokasi dengan menggunakan simbol L1-L6. Di lokasi tersebut, masyarakat telah mengelola IPAL komunal yang telah didesain berbasis daur ulang untuk pertanian.

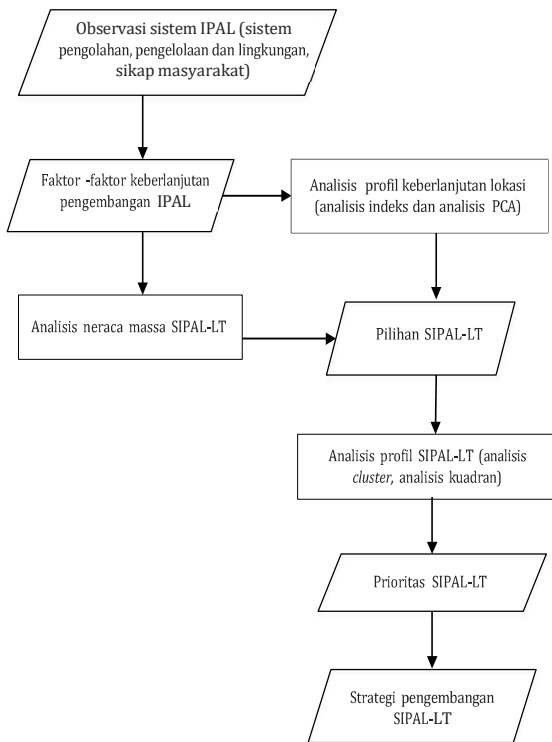
Perencanaan Pilihan Sistem IPAL-LT

Tahapan pemilihan sistem air limbah komunal dan lumpur tinja terintegrasi, selanjutnya disebut SIPAL-LT, dijelaskan pada Gambar 2.



Gambar 1 Lokasi Studi di Kawasan Permukiman DAS Citarum

Sumber: Pemerintah Provinsi Jawa Barat, 2019



Gambar 2 Tahapan Pemilihan SIPAL-LT

Berdasarkan observasi sistem IPAL dan perencanaan umum SIPAL-LT, ditentukan pilihan SIPAL-LT. Perencanaan umum SIPAL-LT ditentukan dengan analisis neraca massa aliran air limbah dan lumpur di setiap pilihan. Analisis neraca massa mempertimbangkan kemampuan penyisihan setiap unit pengolahan dan kapasitas. Rencana layanan secara operasi *batch* (setiap 3 bulan) dari sekitar 30-100 IPAL individual, dengan durasi pengurusan setiap 3-5 tahun. Sementara itu, timbulan lumpur tinja dari IPAL komunal direncanakan pengurusan dengan periode setiap 6-12 bulan.

Penentuan Prioritas SIPAL-LT

Analisis pemilihan SIPAL-LT penting mempertimbangkan faktor-faktor yang berpengaruh di dalam pengembangan IPAL di kawasan permukiman. Pada Gambar 2, faktor-faktor dominan pengembangan IPAL, ditinjau dari faktor sistem IPAL dan karakteristik masyarakat. Nilai faktor-faktor tersebut diperoleh dari observasi lapangan, pengujian kualitas air/lumpur tinja, diskusi masyarakat, kemudian dilakukan analisis indeks. Faktor dominan yang digunakan pada studi ini, diperoleh dari analisis dengan metode *Principal Component Analysis* (PCA). Faktor dominan terdiri dari faktor desain sistem pengolahan, faktor pengelolaan, dan faktor masyarakat (sosial ekonomi, persepsi, dan partisipasi). Hasil analisis deskriptif faktor dominan dan parameter penyusunannya dengan nilai yang telah distandardisasi, dapat dilihat

pada Tabel 1. Selanjutnya, penentuan prioritas SIPAL-LT, menggunakan metode analisis *hierarchy cluster* dan analisis kuadran *importance and performance analysis* (IPA).

Analisis *hierarchy cluster* digunakan untuk membentuk kelompok pilihan SIPAL-LT, menggunakan teknik penggabungan (*agglomerative*), *average linkage*, dan analisis *proximity* dengan jarak *euclidean* diantara faktor yang diobservasi. Analisis matriks standardisasi pada arah vertikal berupa 15 pilihan SIPAL-LT (untuk 6 lokasi studi), dan arah horizontal berupa 17 parameter dominan dalam pengembangan IPAL. Tahapan analisis kluster tersebut meliputi:

- (1) Sistem IPAL-LT referensi ditetapkan yang memiliki nilai terbesar/terkecil dari parameter dominan yang dikaji.
- (2) Perhitungan indeks prioritas SIPAL-LT, berdasarkan indeks modal/kemampuan atau pola pengembangan teknologi (*pattern of development*) serta ukuran upaya yang harus dilakukan (*measure of development*).
- (3) Menghitung jarak antar titik atau jarak matematis dari setiap titik ke titik lainnya, untuk setiap variabel “m” yang dimiliki titik tersebut. Nilai Z_j merupakan jarak setiap sistem terhadap kondisi ideal, yang diasumsikan sebagai modal atau kemampuan lokasi studi untuk mencapai target pengembangan.
- (4) Modal/kemampuan dihitung dianalisis dengan metode jarak *Euclidean*, menggunakan rumus $Z_j = \sqrt{x^2 + y^2}$. Semakin kecil nilai Z_j , maka semakin dekat dengan kondisi ideal atau semakin besar modal yang dimiliki di lokasi studi. Nilai Z_{maks} mencerminkan modal yang perlu dialokasikan (target) untuk mengembangkan SIPAL-LT. Perbandingan antara modal Z_j setiap pilihan teknologi dengan modal/ Z_{maks} , merupakan besarnya upaya (E_j) untuk mencapai target. Semakin kecil nilai E_j , maka semakin mendekati kondisi ideal atau diperlukan sedikit upaya untuk pengembangan SIPAL-LT.

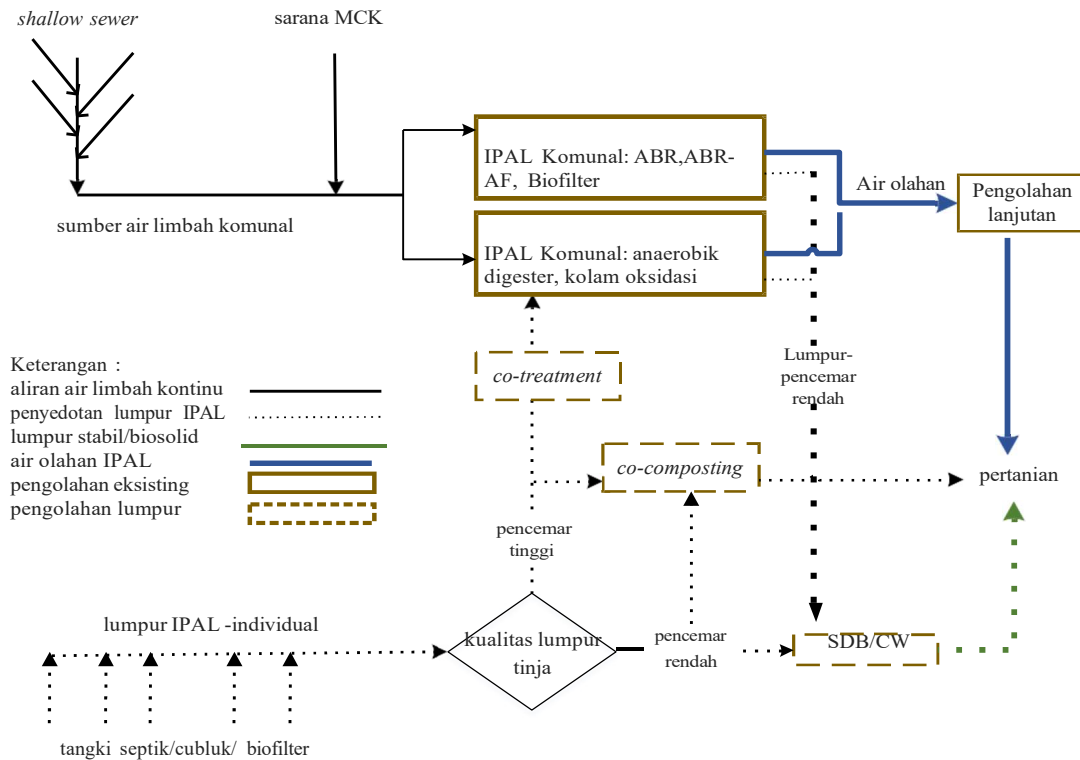
HASIL DAN PEMBAHASAN

Di lokasi studi, sistem IPAL komunal dan IPAL individual belum mengelola lumpur tinjanya secara rutin dan benar. Hal ini dapat berpengaruh terhadap kualitas air olahan dan menyebabkan pencemaran lingkungan.

Peningkatan sistem IPAL desentralisasi tersebut dengan pendekatan terintegrasi sistem air limbah komunal dan lumpur tinja (SIPAL-LT), dapat dilihat skemanya pada Gambar 3.

Tabel 1 Analisis Deskriptif Variabel SIPAL-LT

Faktor	Variabel	Simbol	N	Minimum	Maksimum	Rata rata	Std. Deviation
Sistem Pengolahan	Pengguna IPAL komunal eksisting	PeKom	15	10	50	26,667	16,220
	Jumlah IPAL individual - penyedotan lumpur	Peln	15	80	100	96,000	8,281
	Kapasitas IPAL komunal	Kap	15	2000	20000	8613,333	6745,778
	Indeks influen IPAL komunal	Inko	15	-24	-7	-15,133	5,617
	Indeks efluen IPAL komunal	efko	15	-22	-4	-8,933	6,296
	Waktu detensi	Wadet	15	4	336	117,867	135,365
	Beban padatan	Solid	15	0,48	253,3	67,916	72,899
	Volume lumpur yang diolah	Vpur	15	0,42	7,91	4,171	3,032
	Pengelolaan dan Lingkungan	Operasi dan pemeliharaan	OP	15	1	3,58	2,940
Pemakaian air bersih		Pab	15	50	100	74,000	17,647
Indeks lumpur komunal		Lumko	15	3,38	8,18	4,491	1,640
Indeks lumpur IPAL-individual		Lumset	15	3,21	6,32	4,385	1,129
IPAL individual sesuai persyaratan		PerPal	15	1	2,64	2,091	0,798
Pengaruh tata ruang		Taru	15	1	2,86	2,615	0,656
Sikap masyarakat	Persepsi masyarakat	Persep	15	2,74	4,42	3,803	0,596
	Partisipasi masyarakat	Partis	15	1	2,64	2,091	0,798
	Kemauan masyarakat berorganisasi	Mauor	15	2,44	5,15	3,696	0,870



Gambar 3 Konsep Pengembangan SIPAL-LT

Air limbah yang diolah di IPAL akan menghasilkan lumpur tinja pada periode waktu tertentu. Kualitas lumpur tinja dari sistem IPAL dapat dikategorikan pencemar rendah atau pencemar tinggi, yang dipengaruhi oleh tipe pengolahan, penyediaan air, dan pengurasan lumpur. Selanjutnya, lumpur tinja dapat diolah secara setempat dengan sistem *constructed wetland* (CW), *sludge drying bed* (SDB), *co-composting* atau menggunakan sistem *co-treatment* pada IPAL digester anaerobik (DA).

Pengembangan pengolahan air limbah dan metode daur ulang ini, penting disesuaikan dengan kondisi lokal, serta penting memperhatikan biaya operasi dan pengelolannya sehingga dapat mencegah pencemaran air tanah dan pertanian (Li et al. 2022).

Pilihan SIPAL-LT

Penentuan pilihan SIPAL-LT di lokasi studi dilakukan berdasarkan analisis faktor-faktor berpengaruh dalam pengembangan IPAL, kriteria perencanaan unit-unit pengolahan, dan analisis neraca massa air limbah dan lumpur tinja. Pemenuhan kualitas efluen IPAL dan pengelolaan lumpur tinja merupakan target setiap pilihan SIPAL-LT. Pada perencanaan pilihan SIPAL-LT di lokasi studi, mengacu pada ketentuan yaitu:

- (1) Sumber limbah yang diolah adalah air limbah komunal dan lumpur tinja dari IPAL komunal dan individual sekitarnya (jangkauan maksimum sekitar 1 km). Sistem IPAL komunal yang telah dikelola masyarakat, diantaranya sistem *anaerobic baffled reactor* (ABR), *ABR-anaerobic filter* (ABR-AF), biofilter anaerobik-aerobik dan digester anaerobik.
- (2) Unit pengolahan lumpur tinja dapat merupakan pengolahan tersendiri atau kombinasi dengan pengolahan air limbah komunal (*co-treatment*) atau dengan sampah organik (*co-composting*). Pada sistem *co-treatment* memanfaatkan sisa kapasitas IPAL, diantaranya di unit digester anaerobik. Pada sistem *co-treatment* bahwa penting memperhatikan teknologi IPAL, kapasitas, beban pencemar atau sumber lumpur, dan kondisi operasi (Gupta, Jain, and Chhabra 2018).
- (3) Kategori konsentrasi lumpur tinja untuk menentukan teknologi pengolahan, yaitu:
 - Pada kategori lumpur konsentrasi rendah, pengolahan lumpur sebagai *slurry*, dapat diolah tanpa prapengolahan (Verma Sengupta, and Anand, 2020). Pilihan pengolahan lumpur dapat menggunakan SDB, CW atau *co-composting*, atau *co-treatment* dengan pengolahan lanjutan menggunakan biofilter anaerobik (BA).

- Pada kategori lumpur konsentrasi tinggi, dan biasanya pada kapasitas besar, diperlukan sistem pemisahan padatan-cairan. Selanjutnya, pengolahan terpisah antara fraksi padatan dan fraksi cairan (Gupta, Jain, and Chhabra, 2018). Pengolahan fraksi padatan atau lumpur, di antaranya dapat menggunakan sistem CW, *co-composting*, atau *co-treatment*.
- (4) SIPAL-LT didesain untuk menghasilkan air olahan yang aman dibuang ke badan air atau dimanfaatkan untuk irigasi pertanian. Produk dari SIPAL-LT juga menghasilkan padatan yang telah berkurang kadar airnya (konsentrasi padatan > 20%) dan memenuhi persyaratan lumpur stabil (*biosolid*) untuk digunakan sebagai pupuk pertanian.

Secara umum, spesifikasi setiap pilihan SIPAL-LT terdiri dari kapasitas IPAL komunal, indeks air limbah, indeks lumpur tinja, kapasitas pengolahan lumpur tinja, karakteristik sosial ekonomi, dan kondisi lingkungan.

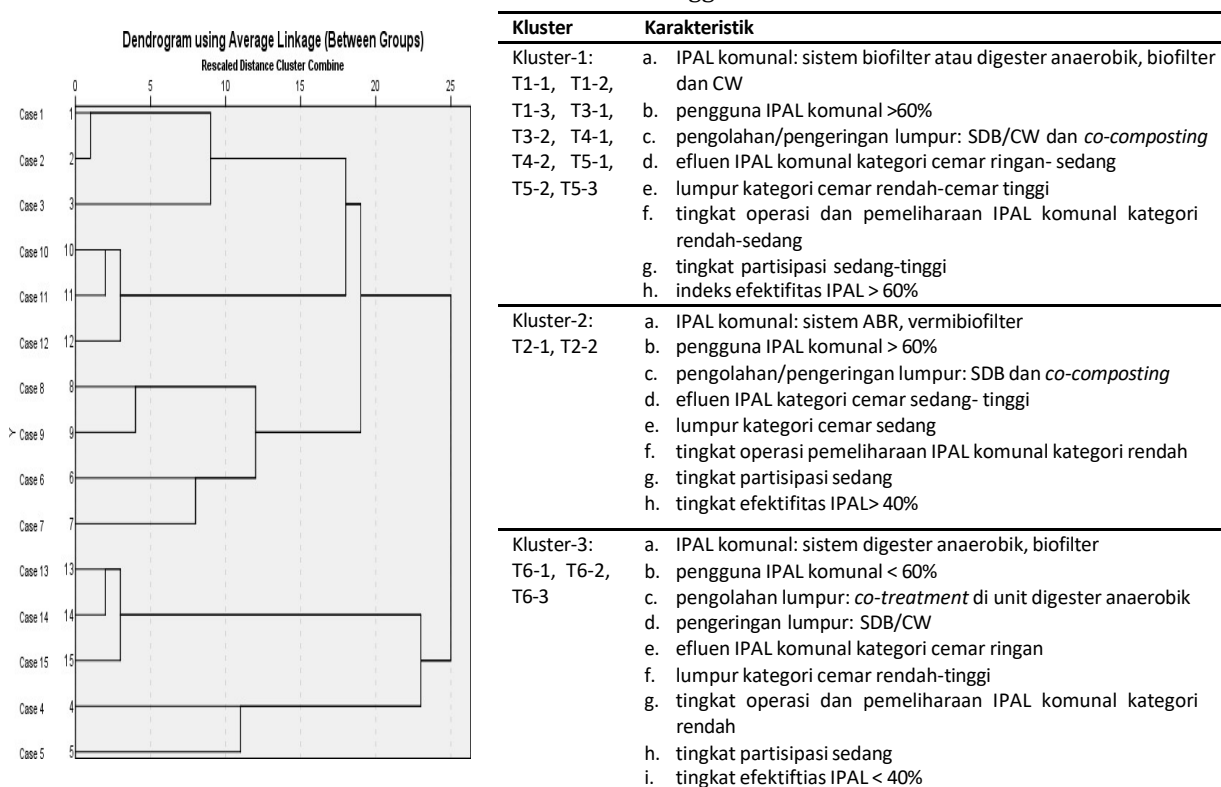
Di lokasi studi, direncanakan terdapat 15 pilihan SIPAL-LT yang masing-masing mempunyai beberapa teknologi sebagaimana diuraikan pada Tabel 2. Setiap

Tabel 2 Pilihan SIPAL-LT di Lokasi Studi

No.	Simbol	Komponen SIPAL-LT	
		IPAL Komunal	Pengolahan lumpur tinja
1	T1-1	BA+CW	UP+CW
2	T1-2	BA+CW	SDB+CW
3	T1-3	BA+CW	SDB+ <i>co-composting</i>
4	T2-1	ABR+VB	UP+CW
5	T2-2	ABR+VB	SDB+ <i>co-composting</i>
6	T3-1	BA	UP+CW
7	T3-2	BA	SDB+ <i>co-composting</i>
8	T4-1	BA2+CW	CW
9	T4-2	BA2	<i>co-composting</i>
10	T5-1	DA+BA+CW	SDB+ <i>co-composting</i>
11	T5-2	DA+BA+CW	CW
12	T5-3	DA+BA+CW	<i>co-composting</i>
13	T6-1	<i>co-treatment</i>	SDB+ <i>co-composting</i>
14	T6-2	DA+BA+CW	CW
15	T6-3	DA+BA+CW	<i>co-composting</i>

Keterangan: BA= biofilter anaerobik, UP= unit pengendapan, CW= *constructed wetland*, SDB= *sludge drying bed*, ABR= *anaerobic baffled reactor*, VB = vermibiofilter, DA= digester anaerobik, T1-1, T1-2, T1-3 = pilihan 1, 2, dan 3 sistem IPAL-LT di L1; T2-1 = pilihan 1 sistem IPAL-LT di L2, dst.

Tabel 1 Proses Pembentukan dan Anggota Kluster SIPAL-LT



pilihan SIPAL-LT tersebut terdiri dari teknologi pengolahan air limbah komunal kapasitas 30-100 KK dan teknologi pengolahan lumpur tinja. Pengolahan lumpur tinja direncanakan dapat menangani lumpur dari IPAL komunal dan sekitar 20-100 IPAL individual (d disesuaikan dengan kedekatan lokasi IPAL komunal). Unit-unit pengolahan pada pilihan SIPAL-LT tersebut, berfungsi untuk pengendapan, pengolahan air limbah, pemisahan cairan-padatan, atau pengeringan.

Kluster dan Prioritas SIPAL-LT

Pemilihan teknologi pada SIPAL-LT ditujukan untuk pencapaian target pengembangan IPAL yang optimal, mencakup pemenuhan kualitas efluen dan pengelolaan lumpur tinja yang efisien. Pemilihan SIPAL-LT dianalisis melalui pembentukan kluster sistem, yang ditujukan untuk pemeringkatan berdasarkan kesamaan karakteristik. Pada studi ini, pembentukan kluster berdasarkan 17 parameter dari faktor-faktor sistem pengolahan, pengelolaan, lingkungan, dan karakteristik masyarakat.

Pembentukan kluster SIPAL-LT menggunakan analisis kluster hierarki berdasarkan 15 pilihan melalui langkah-langkah proses hierarki (Gambar 3). Langkah-1 menggabungkan dua observasi terdekat menurut jarak *Euclidean* yaitu *case*/sistem nomor -1 dan -2 yang mempunyai koefisien jarak terkecil. Selanjutnya, digabungkan dengan pasangan sistem

SIPAL-LT terdekat, yaitu sistem nomor 3, demikian seterusnya. Analisis matriks kluster SIPAL-LT menghasilkan sebesar 67% pilihan SIPAL-LT berada di kluster-1, sebesar 13% pilihan SIPAL-LT di kluster-2, dan sebesar 20% pilihan SIPAL-LT berada di kluster-3.

Pada Tabel 3, pilihan teknologi SIPAL-LT yang termasuk kluster-1 adalah IPAL komunal eksisting yang menggunakan sistem biofilter atau sistem digester anaerobik dilengkapi pengolahan lanjutan, dan pengolahan lumpur direncanakan menggunakan sistem CW atau SDB dan *co-composting*.

Karakteristik SIPAL-LT di kluster-1 ini, memiliki pengguna IPAL komunal lebih dari 60% kapasitas desain dengan kondisi partisipasi masyarakat dalam kategori sedang-tinggi serta tingkat efektifitas IPAL lebih dari 60%. Rencana pengolahan lumpur tinja menggunakan sistem CW dikarenakan adanya dukungan desa dalam penyediaan lahan. Sementara itu, pilihan pengolahan lumpur dengan sistem *co-composting*, sebagai teknologi yang lebih praktis karena telah ada sarana pemilahan dan pengangkutan sampah di beberapa lokasi studi.

Pada kluster-2, terdiri dari IPAL komunal dengan teknologi *Anaerobic Baffled Reactor* (ABR) dan vermibiofilter, dan memiliki pengguna eksisting lebih dari 60% kapasitas. Efluen IPAL mempunyai kategori pencemaran sedang-tinggi karena dipengaruhi tingkat

pemeliharaan dan partisipasi masyarakat. Pengolahan lumpur tinja direncanakan menggunakan sistem SDB dan *co-composting*. Sementara itu, IPAL komunal yang termasuk kluster-3 adalah teknologi digester anaerobik dengan pengolahan lanjutan menggunakan sistem biofilter dan CW. Perencanaan pengolahan lumpur tinja di lokasi ini, menggunakan sistem *co-treatment* di unit digester karena tingkat kapasitas *idle* yang tinggi. Adapun karakteristik sosial pada kluster ini, penting diperhatikan dalam strategi pengembangan IPAL. Sistem *co-treatment* air limbah komunal dan lumpur tinja perlu perhatian tinggi didalam operasi dan pemeliharannya.

Strategi Pengembangan SIPAL-LT

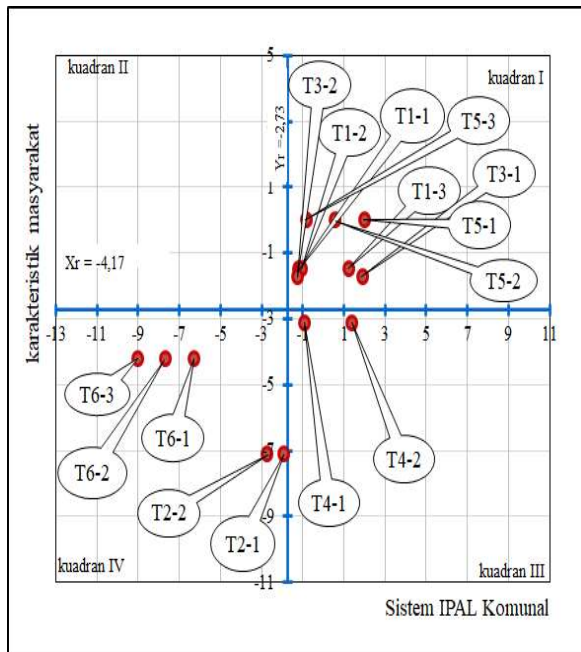
Profil SIPAL-LT di lokasi studi merupakan pendekatan strategis untuk mengetahui kelayakan pengembangan IPAL dan memahami kebutuhan perencanaan. Profil tersebut mempengaruhi langkah langkah dalam pengembangan teknologi. Hal ini karena teknologi pengolahan air limbah mempunyai keuntungan tertentu, karakteristik, kondisi penerapan, dan defisiensi (Chen, 2018). Selain itu, profil SIPAL-LT tersebut digunakan sebagai acuan untuk merumuskan kebijakan dan strategi pengembangan SIPAL-LT berdasarkan parameter yang diobservasi.

Pada Gambar 4 dan Gambar 5 dapat dilihat profil SIPAL-LT, ditinjau dari faktor karakteristik masyarakat dengan faktor sistem IPAL komunal dan faktor pengelolaan IPAL. Perhitungan korelasi variabel pada profil tersebut berdasarkan analisis

PCA. Faktor sistem IPAL komunal terdiri dari parameter kualitas efluen, kualitas influen, jenis pengolahan komunal, waktu detensi, kapasitas, beban hidraulis dan beban organik. Faktor pengelolaan IPAL terdiri dari parameter kualitas lumpur tinja komunal, kualitas lumpur tinja individual, pemeliharaan, dan pemakaian air bersih, iuran masyarakat, pemenuhan persyaratan IPAL individual, dan kondisi tata ruang. Adapun karakteristik masyarakat, terdiri dari parameter sosial ekonomi, partisipasi dan persepsi masyarakat.

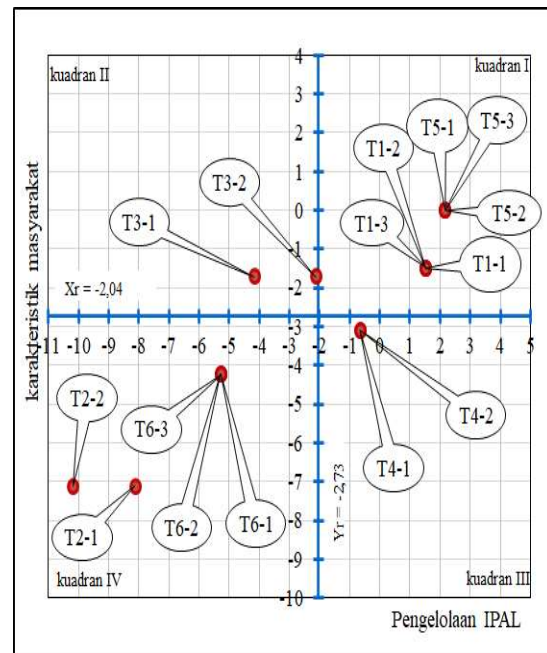
Pada Gambar 4, pilihan SIPAL-LT di L1, L3, dan L5 menempati kuadran I, sedangkan SIPAL-LT di L4 berada di kuadran III, dan SIPAL-LT di L6 dan L2 berada di kuadran IV. Dengan demikian, strategi pengembangan SIPAL-LT di L1, L3, dan L5 dapat dipacu dengan memaksimalkan pemanfaatan sistem IPAL komunal eksisting. Strategi pengembangan SIPAL-LT di L4 yang berada di kuadran III bersifat diversifikasi, yaitu memperbaiki layanan sistem IPAL eksisting sehingga terjadi peningkatan pemahaman atau partisipasi masyarakat. Sementara itu, strategi pengembangan SIPAL-LT di L6 dan di L2 bersifat mempertahankan agar sistem IPAL komunal eksisting tetap beroperasi. Pengembangan SIPAL-LT di L6 dan di L2 belum dapat dilakukan, sebelum adanya perbaikan sesuai parameter-parameter karakteristik masyarakat dan sistem IPAL yang diobservasi.

Kuadran SIPAL-LT ditinjau dari aspek pengelolaan IPAL dan karakteristik masyarakat, dapat dilihat pada



Gambar 4 Kuadran SIPAL-LT Ditinjau dari Karakteristik Masyarakat dan Sistem IPAL

Keterangan: T1-1; T1-2; T1-3 (pilihan SIPAL-LT-1, - 2 dan -3 di L1), T2-1; T2-2 (pilihan SIPAL-LT-1 dan -2 di L2), dst



Gambar 5 Kuadran SIPAL-LT Ditinjau dari Karakteristik Masyarakat dan Pengelolaan IPAL

Keterangan: T1-1; T1-2; T1-3 (pilihan SIPAL-LT-1, - 2 dan -3 di L1), T2-1; T2-2 (pilihan SIPAL-LT-1 dan -2 di L2), dst

Gambar 5. Pengembangan SIPAL-LT di L1 dan L5 termasuk kuadran I, yaitu dapat menerapkan strategi agresif atau memacu pemanfaatan kapasitas IPAL komunal eksisting. Adapun pilihan SIPAL-LT di L4 berada di kuadran II sehingga strategi pengembangannya bersifat peningkatan pemahaman pengelolaan IPAL dan mengembalikan kepercayaan pengguna yang pernah dicapai sebelumnya.

Sementara itu, semua pilihan SIPAL-LT di L6 dan L2 menempati kuadran IV sehingga pengembangan IPAL-LT belum dapat dilakukan sampai tercapainya perbaikan-perbaikan atau peningkatan sesuai parameter pengelolaan dan karakteristik masyarakat. Strategi yang dapat dilakukan di L6 dan L2 saat ini, adalah mempertahankan agar sistem IPAL komunal eksisting tetap dapat beroperasi dan dipelihara sesuai prosedur.

Pada studi ini, untuk mengkaji kelayakan pilihan SIPAL-LT secara menyeluruh, maka analisis kriteria teknis diintegrasikan kedalam satu kesatuan kuadran SIPAL-LT.

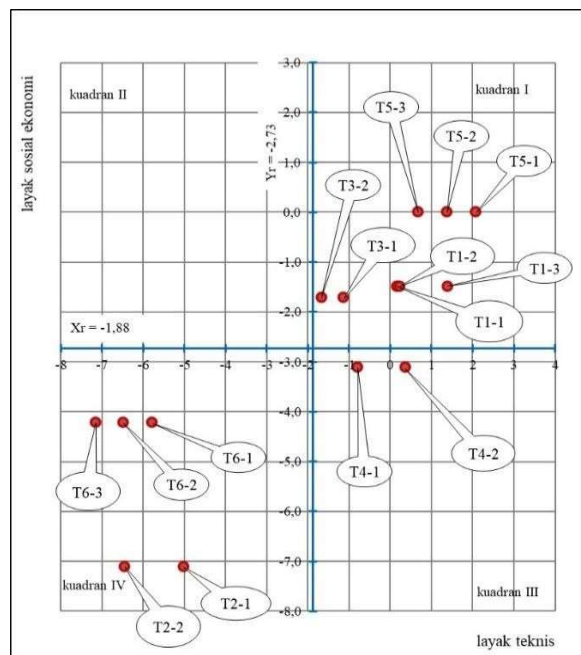
Sistem pengolahan dan pengelolaan, dan lingkungan IPAL diposisikan sebagai faktor teknis, dan karakteristik masyarakat sebagai faktor sosial. Parameter layak teknis ditinjau dari jenis pengolahan, kapasitas, kriteria pengolahan, kualitas influen, kualitas efluen, ketersediaan air bersih, dan kualitas lumpur tinja, pemeliharaan, dan tata ruang sekitarnya. Parameter layak sosial ekonomi ditinjau dari pemahaman, persepsi dan partisipasi masyarakat dalam pemeliharaan sarana prasarana.

Rumusan strategi pengembangan SIPAL-LT berdasarkan profil kelayakan teknis dan kelayakan sosial ekonomi (Gambar 6), adalah sebagai berikut:

- Pilihan SIPAL-LT di L1, L3, dan di L5 layak dikembangkan karena dinilai layak teknis dan layak sosial. Kondisi di lokasi studi tersebut perlu dipertahankan dan ditingkatkan, dengan program pendampingan berkala dalam pemeliharaan sistem IPAL, menjaga kualitas atau kontinuitas sistem penyediaan air bersih, dan tetap memperhatikan penataan ruang sekitar IPAL komunal serta perubahan sosial masyarakat.
- Pilihan SIPAL-LT di L4 telah layak sosial, tetapi belum layak teknis. Diperlukan perbaikan parameter yang diobservasi yaitu sistem penyediaan air bersih, peningkatan kemampuan pengelola untuk pemeliharaan proses pengolahan air limbah komunal, dan perbaikan sarana IPAL individual sesuai persyaratan teknis. Peningkatan parameter-parameter tersebut, merupakan upaya persiapan yang dilakukan sebelum pengembangan SIPAL-LT. Hal tersebut akan akan berpengaruh pada kelayakan teknis.

- Pilihan SIPAL-LT di L2 dan di L6 belum layak teknis maupun layak sosial untuk pengembangan. Diperlukan peningkatan pemeliharaan IPAL, sistem penyediaan air, perbaikan sarana IPAL individual, dan peningkatan pemahaman, persepsi, motivasi, dan partisipasi masyarakat. Selain itu, dibutuhkan upaya penguatan kelembagaan masyarakat, diantaranya dengan Badan Usaha Milik Desa (Bumdes).

Hasil analisis kelayakan SIPAL-LT dirangkum pada pada Tabel 4. Ditinjau dari sistem pengolahan, pilihan SIPAL-LT yang mempunyai nilai Zi kecil (modal pengolahan IPAL komunal besar), yaitu pilihan T2-2, T5-2, dan T5-3. Ditinjau dari nilai Z1, semua pilihan SIPAL-LT di L6 (kluster-3) mempunyai nilai Z1 terbesar atau modal pengembangan kecil sehingga diperlukan upaya besar untuk pencapaian target SIPAL-LT. Ditinjau dari faktor pengelolaan, kluster-1 yang meliputi pilihan SIPAL-LT di L1, L3, L4, dan L5 memiliki nilai rata-rata Z2 lebih kecil (memiliki modal yang lebih besar) dari kluster-2 dan kluster-3. Hal ini menunjukkan upaya untuk mencapai target pengelolaan (Z2maks) yang ditetapkan menjadi paling kecil. Sementara itu, kluster-2 dan kluster-3 memiliki nilai Z2 terbesar atau modal pengembangan yang kecil, sehingga dibutuhkan upaya (E2) lebih besar untuk mencapai target (Z2maks) yang ditetapkan.



Gambar 6 Profil SIPAL-LT Ditinjau dari Kelayakan Teknis dan Kelayakan Sosial Ekonomi

Keterangan: T1-1; T1-2; T1-3 (pilihan SIPAL-LT-1, -2 dan -3 di L1), T2-1; T2-2 (pilihan SIPAL-LT-1 dan -2 di L2), dst

Berdasarkan hasil analisis kuadran untuk kelayakan pilihan SIPAL-LT, dapat dirumuskan skala prioritas pengembangannya (Tabel 4). Prioritas pengembangan SIPAL-LT tersebut adalah sistem terbaik yang dapat dipilih dan dikembangkan di lokasi studi. Kategori baik untuk pengembangan SIPAL-LT sebesar 40%, berada di prioritas-1 sampai prioritas-5, yaitu semua pilihan SIPAL-LT di L5, di L1 (T1-1 dan T1-2), dan di L3 (T3-1).

Tabel 4 Prioritas Pengembangan SIPAL-LT

SIPAL-LT	X	Y	Z	E	Prioritas
T5-2	1,374	0,000	4,418	0,527	1
T5-3	0,676	0,000	4,603	0,549	2
T5-1	2,083	0,000	4,739	0,565	3
T1-1	0,170	-1,482	4,974	0,593	4
T1-2	0,237	-1,482	4,976	0,593	5
T3-1	-1,127	-1,714	5,287	0,630	6
T4-1	-0,789	-3,114	5,438	0,648	7
T1-3	1,389	-1,482	5,545	0,661	8
T3-2	-1,670	-1,714	5,714	0,681	9
T4-2	0,363	-3,114	5,964	0,711	10
T6-2	-6,487	-4,221	7,385	0,881	11
T6-3	-7,152	-4,221	7,470	0,891	12
T6-1	-5,778	-4,221	7,581	0,904	13
T2-2	-6,445	-7,109	7,587	0,905	14
T2-1	-5,020	-7,109	7,878	0,939	15

Keterangan:

X= koefisien faktor; X1= Sistem IPAL; X2= pengelolaan dan lingkungan IPAL; Y = karakteristik masyarakat; Z= modal kelayakan SIPAL-LT; E = upaya pengembangan SIPAL-LT; T1-1, T1-2, T1-3 = 3 pilihan SIPAL-LT di L1; T2-1, T2-2 = 2 pilihan SIPAL-LT di L2.

Pada prioritas-1-5 atau kategori terbaik berada di L5 dan L1, yaitu pengolahan air limbah komunal menggunakan biofilter atau digester anaerobik, sedangkan pengolahan lumpur tinja direncanakan menggunakan CW atau kombinasi SDB dan *co-composting*. Sistem pengolahan lumpur tinja tersebut merupakan opsi terbaik (Tayler, 2018) dan dinilai layak teknis dan layak sosial untuk dikembangkan. Pilihan SIPAL-LT dengan kategori terbaik berada di L5, menggunakan IPAL komunal anaerobik digester dan pengolahan lumpur tinja direncanakan menggunakan CW sesuai kriteria pengolahan lumpur.

Pilihan tersebut termasuk di kluster-1 yang memiliki karakteristik, yaitu air limbah domestik kategori pencemar rendah-sedang, pengguna IPAL lebih dari 60%, lumpur tinja kategori pencemar rendah, indeks efektifitas IPAL lebih dari 60%, dan tingkat partisipasi masyarakat kategori sedang-tinggi.

Pilihan SIPAL-LT di lokasi studi lainnya (prioritas 6 sampai prioritas 15) berkategori baik dan kurang baik untuk pengembangan. Di lokasi tersebut, pengguna IPAL komunal umumnya kurang dari 60% kapasitas desain, menggunakan IPAL komunal teknologi vermibiofilter, biofilter anaerobik-aerobik dan digester anaerobik. Khususnya di lokasi L6, pengolahan lumpur tinja direncanakan sistem *co-treatment* dengan air limbah komunal di sistem digester. Di lokasi tersebut, sesuai analisis profil SIPAL-LT diperlukan peningkatan kelayakan teknis atau parameter-parameter dari faktor sistem pengolahan, pengelolaan dan lingkungan. Selain itu, juga ditinjau dari kelayakan sosial ekonomi masih membutuhkan upaya peningkatan. Hal ini dapat dilakukan dengan pendampingan secara berkala, untuk peningkatan pemahaman masyarakat, peningkatan persepsi mengenai pengolahan air limbah dan lumpur tinja, serta partisipasi pengelolaan IPAL.

Konsep Pengelolaan SIPAL-LT

Pengelolaan infrastruktur air limbah tidak bisa terlepas dari tata kelola pemerintahan yang baik (*good governance*), diartikan sebagai kualitas hubungan antara pemerintah dan masyarakat yang dilayani dan dilindunginya. Pengembangan IPAL komunal direncanakan sebagai sistem yang dapat diintegrasikan dengan pengolahan lumpur tinja. Pengelolaan SIPAL-LT memerlukan keterlibatan *stakeholder* pada setiap tingkat atau rantai kegiatan, serta hubungan pengelolaan air limbah atau lumpur tinja dengan biaya pengelolaan.

Pada Gambar 5, menjelaskan diagram alir pada konsep pengelolaan SIPAL-LT terbaik, yaitu di lokasi studi L5. Di L5 telah menerapkan IPAL komunal teknologi digester anaerobik disertai pengolahan lanjutan dengan sistem biofilter dan CW, sedangkan pengolahan lumpur tinja direncanakan menggunakan sistem CW (sesuai kriteria pengolahan lumpur tinja). Opsi pengurangan biaya pengelolaan SIPAL-LT di L5 tersebut, dapat dilakukan dengan mengembangkan jalur potensi pembiayaan. Selain air olahan dari IPAL komunal yang dapat dimanfaatkan kembali, terdapat juga potensi biogas, dan *slurry* dari proses pengolahan air limbah komunal sehingga memungkinkan pengelola mendapatkan tambahan biaya untuk membantu keberlangsungan kegiatan pemeliharaan atau pengurusan lumpur tinja. Sebagaimana pada pengelolaan lumpur tinja terpusat,

komponen pengurusan dan pengangkutan merupakan permasalahan yang akan mempengaruhi komponen lainnya (Bangun and Abfertiawan, 2022).

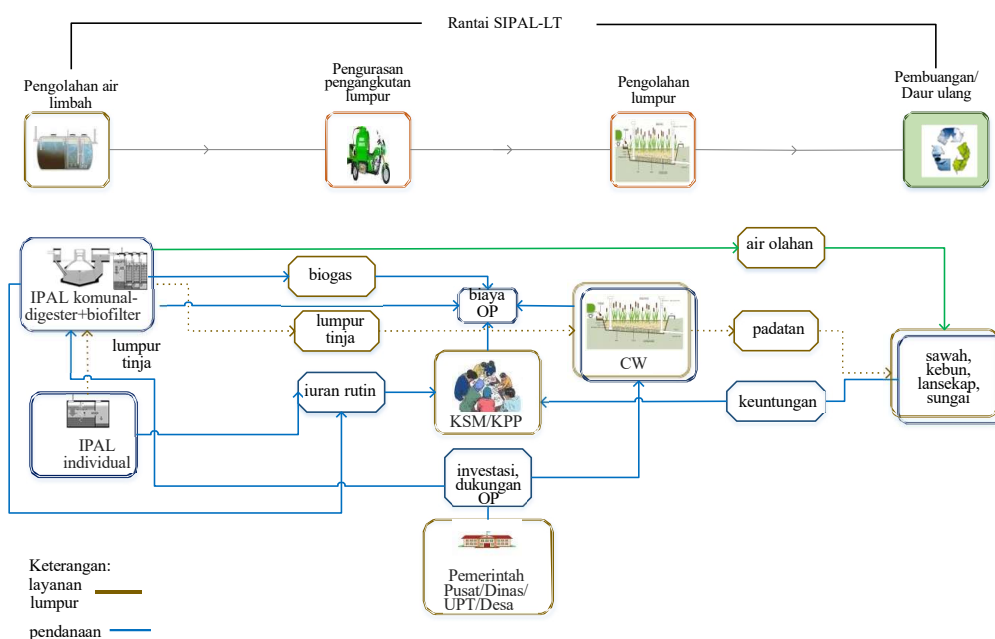
Kompos yang dihasilkan dari SIPAL-LT, perlu didukung peraturan atau sertifikasi kualitas dan pemberian kredibilitas untuk komersialisasinya (Gumilangsari, Abfertiawan, and Soewondo, 2021). Masyarakat di area layanan adalah sebagai pemangku kepentingan utama. Namun, pemerintah pusat dan daerah dan atau lembaga lain penting untuk terlibat dalam pembiayaan berbagai komponen rantai SIPAL-LT, serta bertanggung jawab atas kebijakan atau peraturan atau penetapan standar terkait. Pengawasan dan fasilitasi sarana atau komponen pengolahan air limbah dan lumpur tinja, atau pemanfaatan produk daur ulang di masyarakat, menjadi tanggung jawab pemerintah daerah. Oleh karena itu, masyarakat sebagai pengguna dan pengelola utama SIPAL-LT sangat penting berkolaborasi dengan pemerintah. Dengan demikian, penyediaan sarana prasarana pengembangan IPAL dapat meningkatkan kesadaran sanitasi (Sushanti, Purwanto, and Suprihatin, 2018).

Partisipasi masyarakat memainkan peran yang menentukan untuk keberhasilan setiap proyek desentralisasi dalam pengelolaan air limbah, serta pelaksanaan pemanfaatan kembali produk pengolahan (Bernal, 2018). Semakin baik pemahaman dampak air limbah, maka semakin meningkat motivasi masyarakat untuk pengelolaan sehingga dapat meningkatkan kesehatan. Pengelolaan SIPAL-LT dengan keterlibatan berbagai *stakeholder* akan mendukung penciptaan DPL atau desa 'Peduli Sanitasi' yang bercirikan, mempunyai

kelembagaan, lingkungan yang baik, aman dan sehat, dan mandiri (Rohmat, Setiawan, and Affriani, 2020).

Perencanaan pilihan SIPAL-LT di setiap lokasi studi merupakan acuan dasar implementasi pengembangan IPAL komunal setempat maupun terpusat secara berkelanjutan. Pengembangan SIPAL-LT diprioritaskan di lokasi terkendala akses ke sarana pengolahan lumpur tinja dan memiliki kapasitas tidak termanfaatkan, maka berpotensi untuk pengembangan *resource recovery* (Marleni and Raspati, 2020). Dengan demikian, pengembangan IPAL selain berpotensi pengolahan dan pemanfaatan lumpur tinja tersebut di lokasi timbulan lumpur, juga akan mengurangi biaya pengangkutan lumpur ke sarana pengolahan terpusat (Basamykina, Kharlamova, and Mada, 2020).

Pengembangan konsep *resource recovery* melalui implementasi SIPAL-LT di lokasi studi, akan berkontribusi pada kondisi sosial ekonomi. Hal ini berkaitan dengan manfaat untuk kebutuhan air irigasi dan pupuk pertanian serta dapat meningkatkan tingkat partisipasi masyarakat. Implementasi SIPAL-LT diharapkan dapat membentuk sanitasi mandiri atau siklus proses pengolahan air limbah atau siklus pengelolaan lumpur berkelanjutan secara desentralisasi. Siklus sanitasi ini dapat tercipta pada tingkat lokal menghasilkan produk yang aman dan bermanfaat (Putri and Susanna, 2020). Dengan demikian, terbentuknya siklus air limbah dan lumpur tinja dapat mengurangi pencemaran lingkungan, meningkatkan produktifitas pertanian, dan kesehatan masyarakat.



Gambar 7 Diagram Alir Pengelolaan SIPAL-LT (IPAL-Biodigester dan Pengolahan Lumpur -CW)

KESIMPULAN

Pemilihan dan strategi pengembangan sistem IPAL komunal dan pengolahan lumpur tinja terintegrasi (SIPAL-LT) di lokasi studi, ditentukan dengan proses kluster hierarki dan analisis kuadran. Faktor-faktor keberlanjutan pengembangan IPAL digunakan untuk pembentukan kluster pilihan SIPAL-LT, yaitu berdasarkan faktor sistem pengolahan, pengelolaan, lingkungan, dan karakteristik masyarakat.

Kluster SIPAL-LT terbaik adalah menggunakan IPAL komunal teknologi biofilter atau digester anaerobik, sedangkan pengolahan lumpur tinja direncanakan menggunakan sistem *constructed wetland* (sesuai kriteria pengolahan lumpur) atau kombinasi sistem *sludge drying bed* dengan sistem *co-composting*. Pilihan SIPAL-LT terbaik termasuk di kluster yang memiliki karakteristik, yaitu air limbah domestik kategori pencemar rendah-sedang, pengguna IPAL lebih dari 60% dari kapasitas desain, kategori lumpur tinja pencemar rendah, indeks efektifitas IPAL lebih dari 60%, tingkat pemeliharaan kategori rendah-sedang, dan tingkat partisipasi masyarakat kategori sedang-tinggi.

Pilihan SIPAL-LT dengan kategori terbaik dan kategori baik, layak dikembangkan di beberapa lokasi studi. Untuk strategi pengembangannya dapat mengacu profil SIPAL-LT, sebagai hasil analisis kuadran berdasarkan faktor-faktor dominan yang mempengaruhi keberlanjutan. Analisis kelayakan SIPAL-LT tersebut menjadi dasar implementasi pengembangan IPAL. Dengan demikian, dapat membentuk siklus proses pengolahan air limbah atau siklus pengelolaan lumpur berkelanjutan di kawasan permukiman, terutama yang memiliki keterbatasan akses ke sarana pengolahan lumpur tinja terpusat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Ir. Dian Irawati, M.T., dan Ir. Dwi Kuryanto, M.T., atas dukungan kegiatan melalui Program Penelitian Inovasi dan Kegiatan Perekayasaan di Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Penghargaan yang tinggi, penulis juga sampaikan kepada Prof. (R). Dr. Ir. R. Pamekas atas bimbingan selama penelitian ini, serta rekan-rekan di Bina Teknik Permukiman dan Perumahan.

DAFTAR PUSTAKA

Bangun, C. & Abfertiawan, S., M., 2022. "Determining Strategies for Improving LLTT Business Performance with Inequal (Internal Quality) and Servqual (Service Quality) Analysis Case Study: Deli Serdang, North Sumatera)". Budapest

International Research and Critics Institute- Journal (BIRCI-Journal) 5(3): 26401-26413.

Bao, Pham Ngoc, Muhammad Sonny Abfertiawan, Pankaj Kumar, and Muhammad Fahmi Hakim. 2020. "Challenges and Opportunities for Septage Management in the Urban Areas of Indonesia – Case Study in Bandung City." *Journal of Engineering and Technological Sciences* 52 (4): 481–500.

Basamykina, Alena, Marianna Kharlamova, and Sharon Yeukai Mada. 2020. "Dewatering as a Primary Treatment of Fecal Sludge in Individual Residential Sector (a Technologies Review)." *E3S Web of Conferences* 169 (May).

Bernal, Diana. 2018. "A Conceptual Model for Decentralized Municipal Wastewater Management." *Water Practice and Technology* 13 (1): 134–42.

Brontowiyono, Widodo, Thomas Boving, Adelia Anju Asmara, Suphia Rahmawati, Andik Yulianto, Noviani Ima Wantoputri, Annisa Nur Lathifah, and Yuli Andriansyah. 2022. "Communal Wastewater Treatment Plants' Effectiveness, Management, and Quality of Groundwater: A Case Study in Indonesia." *Water (Switzerland)* 14 (19): 1–24.

Chen, X., Xu, Z., Yao, L. & Ma, N. 2018. Processing Technology Selection for Municipal Sewage Treatment Based on a Multi-Objective Decision Model under Uncertainty. *Journal International of Environmental Research and Public Health* 15 (3): 448.

Conville, Mc. J.R., Kvarnström, E., Maiteki, J.M., and Niwagaba, C.B. 2019. "Infrastructure investments and operating costs for fecal sludge and sewage treatment systems in Kampala, Uganda." *Urban Water Journal* 16 (8): 584-593.

Food Agricultural Organization and Toilet Board Coalition. 2021. Future proofing agriculture systems. Circular sanitation economies for more resilient and sustainable food systems. Land and Water Discussion Paper No. 18. Rome: FAO.

Gumilangsari, Saffanah, Muhammad Sonny Abfertiawan, and Prayatni Soewondo. 2021. "Studi Model Bisnis Eksisting Dalam Implementasi Layanan Lumpur Tinja Terjadwal (LLTT) Di Bawah Satuan Kerja (Studi Kasus: Kota Bekasi Dan Kota Makassar) dan BUMD (Studi Kasus: Kota Medan Dan Kota Surakarta)." *Jurnal Ilmu Lingkungan* 19 (3): 599–611.

Gupta, Sanjay, Shubhra Jain, and Shikha Shukla Chhabra. 2018. "Guidance Note on Co-Treatment of Septage at Sewage Treatment Plants in India," no. April.

Kazora, Amos Shyaka, and Khaldoon A. Mourad. 2018. "Assessing the Sustainability of Decentralized Wastewater Treatment Systems in Rwanda." *Sustainability (Switzerland)* 10 (12).

- Keucken A., Habagil M., Batstone D., Jeppsson U., and Arnell M. 2018. "Anaerobic co-digestion of sludge and organic food waste-performance, inhibition, and impact on the microbial community." *Energies* 11, 2325.
- Li, Zihan, Xiaoming Hu, Xiaoqiang Zhang, Lixue Gong, Zhen Jiang, Yanan Xing, Juan Ding, Jun Tian, and Juan Huang. 2022. "Distributed Treatment of Rural Environmental Wastewater by Artificial Ecological Geographic Information System." *Journal of King Saud University - Science* 34 (3): 101806.
- Libralato, Giovanni, Annamaria Volpi Ghirardini, and Francesco Avezzù. 2012. "To Centralise or to Decentralise: An Overview of the Most Recent Trends in Wastewater Treatment Management." *Journal of Environmental Management* 94 (1): 61-68.
- Marleni, Ni Nyoman Nepi, and Gema Sakti Raspati. 2020. "A Critical Review of Wastewater Resource Recovery Implementation in Indonesia." *Journal of the Civil Engineering Forum* 6 (1): 89.
- Mata-Alvarez, J., J. Dosta, M. S. Romero-Güiza, X. Fonoll, M. Peces, and S. Astals. 2014. "A Critical Review on Anaerobic Co-Digestion Achievements between 2010 and 2013." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 36: 412-27.
- Pemerintah Provinsi Jawa Barat. 2019. Rencana Aksi Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan DAS Citarum 2019-2025. Bandung: Pemerintah Provinsi Jawa Barat.
- Piasecki, Adam. 2019. "Water and Sewage Management Issues in Rural Poland." *Water (Switzerland)* 11 (3).
- Priyambada, I B, and Purwono. 2019. "Efektivitas IPAL Portabel Sebagai Alternatif Pengelolaan Limbah Cair Domestik." *Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan* 3 (1): 235-43.
- Rohmat, Dede, Iwan Setiawan, and Asri Ria Affriani. 2020. "Zonasi Karakteristik Pencemaran Untuk Penyusunan Strategi Dan Pola Aksi Penanganan Sungai Menuju Citarum Harum (Pemetaan Dengan Citra Tegak Resolusi Tinggi)." *Jurnal Geografi Gea* 20 (1): 16-25.
- Strande, Linda, Lars Schoebitz, Fabian Bischoff, Daniel Ddiba, Francis Okello, Miriam Englund, Barbara J. Ward, and Charles B. Niwagaba. 2018. "Methods to Reliably Estimate Faecal Sludge Quantities and Qualities for the Design of Treatment Technologies and Management Solutions." *Journal of Environmental Management* 223 (February): 898-907.
- Sugito. 2022. "Panduan Fasilitasi Desa Peduli Kesehatan," 1-51.
- Taylor, Kevin. 2018. *Fecal Sludge and Septage Treatment. A Guide for Low and Middle Income Countries*. Rugby, UK: Practical Action Publishing.
- Thomas, R.A., Kranert, M. & Philip, L. 2018. "In-vessel co-composting – a rapid resource recovery option for septage treatment in Indian cities". *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development* 8(4): 688-697.
- Verma, R., Sengupta, S., and Anand, S. 2020. *Toolkit: Managing Fecal Sludge in Rural Areas*. New Delhi: Centre for Science and Environment.
- Silva, D.T.G., Dias, E., Ebdon, J., and Taylor, H. 2018. "Assessment of recommended approaches for containment and safe handling of human excreta in emergency settings." *PLOS ONE* 13(7).
- Starkl, M., Brunner, N., Das, S., and Singh, A. 2022. "Sustainability Assessment for Wastewater Treatment Systems in Developing Countries." *Water* 14 (2):241.
- Sushanti, D., Purwanto, and Suprihatin. 2018. "Evaluasi Pengolahan Air Limbah Domestik dengan IPAL Komunal." *JTL* 19 (2): 229 – 237.
- Putri, S.R. and Susanna. 2020. "Kondisi Sanitasi Dasar dengan Kejadian Diare di Kawasan Pesisir Pantai Desa Sedari, Kabupaten Karawang, Jawa Barat Tahun 2018". *Jurnal Nasional Kesehatan Lingkungan Global* 1(2).