

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan Masalah

Dinamika aktivitas harian yang intensif di lingkungan kampus—baik dari kegiatan perkuliahan, kemahasiswaan, maupun administratif—secara langsung memicu lonjakan volume timbulan sampah yang sangat signifikan. Merujuk pada data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) tahun 2023, sisa makanan (41,6%) dan material plastik (18,7%) masih mendominasi komposisi sampah di Indonesia, sebuah pola yang juga tercermin kuat pada fasilitas penampungan di area perguruan tinggi [1].

Idealnya, pengelolaan aliran limbah yang heterogen ini ditangani melalui sistem cerdas yang terintegrasi sejak dari sumbernya. Namun pada praktiknya, fasilitas kebersihan di area kampus umumnya masih beroperasi secara konvensional, yang acap kali disebabkan oleh kebijakan pengelolaan yang belum menyeluruh serta kurangnya sosialisasi kepada civitas akademika [2]. Kondisi ini memicu masalah mendasar berupa tercampurnya material organik yang mudah membusuk dengan limbah anorganik. Kontaminasi silang ini mendegradasi kualitas material yang seharusnya memiliki nilai ekonomi tinggi menjadi tercemar, sehingga mereduksi kelayakannya untuk didaur ulang [3]. Akibatnya, meski secara hitungan kuantitas limbah tersebut masih potensial, penurunan kualitasnya membuat upaya pemanfaatan kembali menjadi sangat sulit untuk dilakukan.

Tabel 1.1 Dampak Pencampuran Sampah Terhadap Potensi Daur Ulang [3]

Skenario Penampungan	Kondisi Material	Dampak Teknis	Estimasi Penurunan Nilai Ekonomi
Terpilah (Ideal)	Plastik kering, Kertas bersih, Organik terpisah.	Proses daur ulang efisien; Kertas dapat didaur ulang menjadi bubur kertas; Plastik langsung dicacah.	0% (Optimal)
Tercampur (Kondisi Aktual)	Plastik kotor terkena minyak/kuah; Kertas basah/hancur.	Kertas menjadi residu (tidak bisa didaur ulang); Plastik butuh pencucian intensif (boros air & energi).	40% - 60% (Untuk Plastik) 100% (Untuk Kertas - Menjadi Sampah)

Selain itu, ketiadaan pengendalian terhadap volume dan kondisi sampah turut memperparah permasalahan. Tempat sampah di area kampus umumnya tidak dilengkapi dengan mekanisme pemantauan kapasitas, sehingga sampah sering dibiarkan menumpuk hingga penuh atau meluap. Penumpukan ini mempercepat proses pembusukan sampah basah dan meningkatkan tingkat pencemaran pada sampah kering di sekitarnya, yang pada akhirnya menurunkan kelayakan sampah untuk dimanfaatkan kembali [3].

Permasalahan berikutnya adalah pembusukan sampah organik yang tidak terkendali. Sampah organik yang menumpuk dalam waktu lama akan mengalami proses dekomposisi biologis yang menghasilkan bau tidak sedap dan cairan lindi. Kondisi ini tidak hanya menurunkan kenyamanan lingkungan kampus, tetapi juga menjadi indikator bahwa pengelolaan sampah pada tahap awal pembuangan tidak

berjalan dengan baik. Pembusukan ini secara langsung berkontribusi terhadap rendahnya kualitas sampah campuran, sehingga semakin kecil peluang sampah tersebut untuk dimanfaatkan kembali [4].

Selain faktor teknis, rendahnya kesadaran dan kedisiplinan sivitas akademika dalam membuang sampah sesuai jenisnya juga menjadi penyebab rendahnya tingkat pemanfaatan kembali[5]. Tanpa sistem yang jelas dan mudah diterapkan, perilaku membuang sampah secara campur menjadi kebiasaan yang sulit diubah. Kondisi ini menunjukkan bahwa permasalahan rendahnya pemanfaatan kembali sampah bukan semata-mata disebabkan oleh ketiadaan teknologi pengolahan, tetapi lebih disebabkan oleh lemahnya sistem pengelolaan pada tahap awal pembuangan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, dapat disimpulkan bahwa rendahnya tingkat pemanfaatan kembali sampah di lingkungan kampus disebabkan oleh tidak efektifnya pengelolaan sampah sejak sumber, yang mencakup tidak adanya pemilahan awal, minimnya pengendalian volume, serta pembusukan sampah organik yang tidak terkendali. Oleh karena itu, diperlukan solusi berbasis rekayasa yang berfokus pada pengendalian kondisi sampah sejak tahap awal pembuangan guna meningkatkan kualitas sampah dan membuka peluang pemanfaatan kembali di tahap selanjutnya.

Apabila permasalahan tersebut dapat diatasi dengan pendekatan yang tepat, maka dampak positifnya akan dirasakan secara luas oleh lingkungan kampus secara keseluruhan, baik dari sisi kebersihan, kesehatan lingkungan, maupun keberlanjutan pengelolaan sampah.

1.1.1 Informasi Pendukung Masalah

Berdasarkan pengamatan umum, jenis sampah yang dominan di area kampus terdiri atas sampah organik, plastik, dan sampah anorganik lainnya. Sampah tersebut umumnya dibuang secara langsung tanpa pemilahan, sehingga seluruh jenis material tercampur dalam satu wadah.

Studi mengenai karakteristik sampah di beberapa perguruan tinggi di Indonesia menunjukkan bahwa persentase sampah organik (sisa makanan dan guguran daun) dan sampah anorganik yang dapat didaur ulang (kertas dan plastik) memiliki proporsi terbesar. Namun, ketiadaan sistem pemilahan yang terintegrasi di sumber menyebabkan potensi daur ulang menurun drastis[2].

Tabel 1.2 Komposisi Rata-rata Timbulan Sampah di Area Kampus di Indonesia[6], [7]

Jenis Sampah	Persentase Berat (%)	Sumber Dominan	Karakteristik Fisik
Organik (Sisa Makanan & Taman)	40% - 55%	Kantin, Sisa Bekal, Taman Kampus	Basah, kadar air tinggi (>60%), mudah membusuk, berpotensi menghasilkan lindi.
Kertas & Karton	20% - 25%	Administrasi, Tugas Mahasiswa, Kemasan	Kering, namun mudah menyerap air/minyak jika tercampur organik.
Plastik (Kemasan)	15% - 20%	Botol Minum (PET), Gelas Plastik (PP), Kantong Kresek (LDPE)	Ringan (densitas rendah), volume besar (memakan ruang), nilai ekonomi tinggi jika bersih.
Lain-lain (Logam, Kaca, Residu)	5% - 10%	Kaleng minuman, pecahan alat lab, tisu bekas	Material campuran yang sulit didaur ulang atau residu B3.

Data pada Tabel 1.2 memperlihatkan bahwa hampir 35-45% dari total sampah kampus (gabungan kertas dan plastik) sebenarnya memiliki nilai ekonomi tinggi jika terpilah dengan baik. Namun, pengamatan di lapangan menunjukkan fenomena pencampuran sampah yang masif. Laju timbunan sampah per orang di lingkungan kampus diperkirakan mencapai 0,3 – 0,5 kg/orang/hari[2], yang jika dikalikan dengan jumlah populasi kampus yang mencapai ribuan, menghasilkan tonase sampah harian yang membebani tempat penampungan sementara (TPS).

Tantangan operasional mendasar pada infrastruktur tempat sampah konvensional saat ini adalah ketiadaan mekanisme penginderaan fisik terkait status okupansi ruang. Laju penumpukan sampah di area publik bersifat sangat fluktuatif dan sulit diprediksi, sehingga seringkali tidak sinkron dengan jadwal pengangkutan yang bersifat statis. Ketiadaan data *real-time* mengenai volume keterisian ini mengakibatkan inefisiensi operasional ganda: risiko sampah meluap (*overflow*) yang mengganggu estetika lingkungan, atau sebaliknya, inefisiensi logistik akibat pengangkutan pada wadah yang belum mencapai kapasitas optimal [55]. Tanpa adanya instrumen yang mampu mendeteksi keberadaan dan kuantitas objek secara fisik, manajemen pengelolaan sampah terjebak pada pola manual yang reaktif dan tidak terukur.

Masalah krusial selanjutnya adalah ketidakmampuan infrastruktur penampungan eksisting untuk memverifikasi jenis limbah yang masuk. Meskipun aturan pemilahan sampah seringkali telah diberlakukan, tingkat kedisiplinan pembuangan sampah pada wadah yang sesuai masih rendah akibat faktor *human error* atau ketidakpedulian pengguna. Ketiadaan instrumen yang mampu melakukan identifikasi visual otomatis menyebabkan sampah basah dan kering seringkali tercampur (*mixed waste*) dalam satu wadah. Kontaminasi silang ini tidak hanya mempersulit proses daur ulang di tahap lanjut, tetapi juga mempercepat degradasi material yang seharusnya bisa didaur ulang [56]. Tanpa adanya sistem yang dapat mengenali karakteristik objek secara objektif, efektivitas manajemen sampah sangat bergantung pada kepatuhan pengguna yang tidak terjamin konsistensinya.

Selain masalah fisik, dominasi sampah organik (40-55%) memiliki implikasi langsung terhadap kualitas udara di sekitar tempat penampungan. Secara kimiawi,

proses dekomposisi material organik khususnya sisa makanan yang mengandung protein akan melepaskan berbagai senyawa volatil (*Volatile Organic Compounds*). Secara spesifik, gas Amonia (NH_3) terbentuk melalui proses amonifikasi, yaitu ketika bakteri pengurai memecah asam amino dan nitrogen organik yang terkandung dalam sisa lauk-pauk atau sayuran basah [54]. Keberadaan amonia menjadi parameter krusial karena gas ini muncul pada fase awal pembusukan sebelum gas metana terbentuk dalam jumlah besar.

Kondisi bau pada tempat sampah dapat didefinisikan secara lebih spesifik berdasarkan konsentrasi gas tersebut. Amonia memiliki karakteristik bau yang tajam dan menyengat. Meskipun ambang batas penciuman manusia bervariasi, bau amonia mulai dapat terdeteksi pada konsentrasi 5–25 ppm (*parts per million*). Pada kondisi di mana konsentrasi mencapai atau melebihi 50 ppm, bau tersebut dikategorikan sebagai gangguan kenyamanan yang signifikan dan indikator kuat bahwa pembusukan anaerobik sedang berlangsung secara intensif [54]. Oleh karena itu, penetapan ambang batas pada sistem ini tidak hanya mengacu pada persepsi penciuman subjektif, melainkan pada parameter konsentrasi gas amonia yang terukur di atas ambang gangguan sebagai sinyal peringatan dini.

Tingginya kelembapan pada sampah organik kampus (>60%) turut mempercepat reaksi hidrolisis ini, sehingga lonjakan konsentrasi bau dapat terjadi lebih cepat [54]. Selain itu, tingginya uap air di sekitar tumpukan sampah juga berfungsi sebagai media pembawa (*carrier*) bagi molekul bau, yang menyebabkan aroma tidak sedap dapat tercium lebih kuat dan menyebar pada radius yang lebih luas dibandingkan pada kondisi sampah kering.

Berdasarkan karakteristik material tersebut, tantangan utama dalam pengelolaan sampah kampus dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Dominasi Organik Basah: Tingginya kadar air pada sampah organik mempercepat pembusukan, yang jika tercampur dengan plastik akan menciptakan lapisan kotoran (biofilm) yang sulit dibersihkan[3].

2. Volumetrik Sampah Plastik: Meskipun secara berat hanya berkontribusi sekitar 15-20% dari total timbunan, sampah plastik (khususnya botol dan kemasan) memiliki densitas yang sangat rendah namun memakan volume ruang (bulk density) yang signifikan, seringkali mencapai 50-60% dari total volume wadah. Disparitas antara berat dan volume ini menyebabkan tempat sampah terlihat penuh secara visual (semu) jauh sebelum kapasitas beratnya tercapai, yang memicu frekuensi pengangkutan yang tinggi namun tidak efisien secara logistik .
3. Ketiadaan Data Real-time: Petugas kebersihan tidak memiliki informasi mengenai titik mana yang penuh, menyebabkan inefisiensi rute pengangkutan[8].

Oleh karena itu, diperlukan intervensi khusus yang tidak hanya menyediakan wadah, tetapi mampu melakukan klasifikasi otomatis untuk mencegah kontaminasi sejak awal, serta memantau kapasitas untuk mencegah penumpukan berlebih.

Berdasarkan kondisi tersebut, dapat disimpulkan bahwa rendahnya tingkat pemilahan dan daur ulang sampah di area kampus disebabkan oleh ketiadaan sistem yang mampu mengendalikan kondisi sampah sejak tahap awal.

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengusulkan berbagai pendekatan pemilahan sampah otomatis, mulai dari penggunaan sensor sederhana, penerapan visi komputer (computer vision), hingga integrasi metode pembelajaran mesin (machine learning). Meskipun setiap pendekatan menawarkan peningkatan dalam akurasi klasifikasi dan efisiensi pemrosesan, masing-masing solusi masih menghadapi kendala teknis, terutama ketika dihadapkan pada kondisi fisik sampah yang sangat heterogen dan dinamis. Untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai status teknologi saat ini, Tabel 1.3 merangkum perbandingan beberapa solusi yang telah ada beserta analisis kelebihan dan kekurangannya.

Tabel 1.3 Solusi yang telah ada

No	Solusi	Kelebihan	Kekurangan	Referensi
----	--------	-----------	------------	-----------

1	Sistem Klasifikasi Sampah Berbasis Deep Learning (CNN): Sistem menggunakan kamera resolusi tinggi dan algoritma Convolutional Neural Network (seperti YOLO atau ResNet) untuk mengenali jenis sampah secara visual.	1. Akurasi pengenalan objek sangat tinggi untuk berbagai variasi bentuk sampah. 2. Mampu mengenali banyak kelas sampah (kaca, kertas, plastik, logam, organik).	1. Biaya Tinggi: Membutuhkan hardware komputasi yang mahal (NVIDIA Jetson). 2. Konsumsi Daya Tinggi: Proses komputasi berat boros energi. 3. Kompleksitas: Waktu pemrosesan (latency) cenderung lebih lama dibanding sensor fisik.	[9]
2	Sistem Monitoring Kapasitas Sampah Berbasis IoT (Smart City) Fokus pada pemantauan level kepenuhan tong sampah menggunakan sensor ultrasonik yang terhubung ke internet untuk optimalisasi rute truk sampah.	1. Efisiensi Operasional: Sangat efektif mengurangi biaya transportasi pengangkutan sampah. 2. Low Maintenance: Sistem sederhana dan tahan lama. 3. Hemat Energi: Sensor hanya aktif secara periodik.	1. Tidak Ada Separasi: Sampah tetap tercampur di sumber (kering dan basah jadi satu). 2. Pasif: Tidak menangani masalah bau atau pembusukan sampah di tempat. 3. Mengandalkan kesadaran pengguna sepenuhnya.	[10]
3	Pemisah Sampah Logam dan Non-Logam Berbasis Sensor Proximity	1. Robust (Tahan Banting): Sensor fisik tidak terpengaruh pencahayaan.	1. Klasifikasi Terbatas: Sulit membedakan sampah organik	[11]

	Menggunakan sensor induktif (logam) dan kapasitif (plastik/kaca) pada conveyor belt untuk memisahkan sampah berdasarkan materialnya.	2. Biaya Rendah: Komponen sensor relatif murah dan mudah didapat.	basah dengan plastik basah. 2. Mekanisme Rumit: Membutuhkan sistem conveyor yang memakan tempat (tidak spread). 3. Sering terjadi kesalahan deteksi sampah pada komposit (campuran).	
--	--	---	--	--

Adapun stakeholder pada sistem ini adalah sebagai berikut

1. Civitas Akademika, Civitas akademika merupakan kelompok pengguna akhir utama yang mencakup mahasiswa, dosen, tenaga kependidikan, serta tamu yang beraktivitas di lingkungan kampus. Kelompok ini memegang peranan paling mendasar dalam ekosistem sistem karena berposisi sebagai penghasil timbulan sampah harian yang menjadi input utama bagi alat.
2. Unit Pengelola Kebersihan dan Fasilitas Kampus, Unit pengelola kebersihan dan fasilitas kampus bertindak sebagai operator teknis yang bertanggung jawab langsung terhadap operasional harian, pemantauan, dan pemeliharaan sistem. Keberadaan pemangku kepentingan ini menjadi alasan kuat pengembangan fitur monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT) pada sistem, mengingat mereka membutuhkan data *real-time* mengenai kapasitas volume dan status bau untuk mengubah pola kerja dari pengangkutan terjadwal manual menjadi pengangkutan berbasis kondisi aktual.
3. Mitra Industri Daur Ulang, Mitra industri daur ulang merupakan pihak eksternal yang berperan sebagai penerima manfaat hilir dari luaran sistem, khususnya untuk material anorganik bernilai ekonomi tinggi seperti plastik yang memiliki nilai jual lebih tinggi dan lebih siap olah bagi industri,

sekaligus memvalidasi aspek keberlanjutan finansial dari proyek melalui potensi pendapatan dari penjualan material daur ulang.

1.1.2 Analisis Masalah dan Konstrain

1. Aspek Lingkungan

Pencampuran dan penumpukan sampah menyebabkan penurunan kualitas lingkungan kampus. Sampah organik yang membusuk menghasilkan bau tidak sedap dan berpotensi menarik vektor penyakit, sehingga mengganggu kebersihan lingkungan sekitar.

2. Aspek Operasional

Tidak adanya sistem pemantauan volume dan kondisi sampah menyebabkan penanganan bersifat reaktif. Penumpukan sampah menjadi sulit dikendalikan dan memperburuk kondisi tempat penampungan.

3. Aspek Teknis

Pengelolaan sampah yang masih manual tidak mampu menangani kompleksitas jenis sampah dan dinamika timbulan sampah harian secara efektif.

4. Aspek Kesehatan

Sampah organik yang membusuk meningkatkan risiko gangguan kesehatan akibat bau, cairan lindi, dan potensi kontaminasi lingkungan sekitar. Proses pembusukan yang tidak terkendali menghasilkan gas berbahaya seperti metana (CH_4) dan Amonia (NH_3) yang dapat memicu gangguan pernapasan ringan hingga ISPA untuk sekitar. Selain itu, tumpukan sampah basah mengundang lalat dan tikus yang berisiko menyebarkan penyakit seperti diare, disentri di lingkungan kampus.

5. Aspek Sosial

Rendahnya kedisiplinan dalam identifikasi sampah secara mandiri menjadi tantangan utama untuk mengatasi kebiasaan membuang sampah sembarangan yang sulit diubah dalam waktu singkat.

6. Aspek Ekonomi

Pencampuran sampah menurunkan nilai jual material daur ulang secara drastis hingga menjadi tak bernilai

7. Konstrain Sistem

- a. Sistem dirancang untuk skala area kampus.
- b. Sampah dibuang tanpa menggunakan kantong plastik.
- c. Sampah yang dimasukkan harus memiliki dimensi maksimal 15cm x 15 cm agar dapat melewati lubang *inlet* dengan diameter 18 cm dan tidak menyumbat mekanisme spreading
- d. Sistem harus dapat diwujudkan dalam bentuk prototipe berbasis perangkat keras dan komputasi sederhana.
- e. Sistem bekerja secara otomatis tanpa mengandalkan pemilahan manual oleh manusia.
- f. Sistem tidak dapat mengklasifikasikan berdasarkan golongan resin plastik

1.1.3 Kebutuhan yang harus dipenuhi

Berdasarkan analisis permasalahan, kebutuhan yang harus dipenuhi adalah sebagai berikut:

1. Sistem mampu melakukan identifikasi sampah berdasarkan jenisnya sejak tahap awal pembuangan.
2. Sistem mampu memantau kapasitas sampah secara otomatis untuk mencegah penumpukan berlebih.
3. Sistem mampu melakukan penyebaran sampah secara horizontal pada penumpukan sampah untuk memperbanyak ruang sampah.
4. Sistem mampu mendeteksi kondisi sampah yang berpotensi menimbulkan bau.
5. Sistem mampu menghasilkan keluaran berupa status dan kondisi sampah secara otomatis.

1.1.4 Tujuan

Berdasarkan kebutuhan yang telah ditetapkan, tujuan yang ingin dicapai adalah:

1. Merancang sistem pengelolaan sampah berbasis rekayasa yang mendukung identifikasi sampah.
2. Mengimplementasikan mekanisme pemantauan kapasitas dan kondisi sampah secara otomatis.

3. Meningkatkan potensi daur ulang dan pemanfaatan kembali sampah melalui pengelolaan awal yang terkontrol secara sistematis.

1.2 Solusi

1.2.1 Karakteristik Solusi

Berdasarkan permasalahan yang dihadapi, berikut adalah fitur-fitur penting yang diperlukan pada solusi yang ditawarkan untuk pengelolaan sampah otomatis di kampus.

1.2.1.1 Fitur Dasar

1. *Sensing Capability*

Solusi yang ditawarkan harus mampu mendeteksi kondisi sampah secara *real-time*, termasuk tingkat kepenuhan dan jenis sampah (basah, kering, atau plastik), menggunakan sensor yang akurat untuk memastikan pemantauan yang efektif.

2. *Waste Classification Capability*

Solusi yang ditawarkan harus dapat mengidentifikasi jenis sampah secara otomatis sejak awal pembuangan, mengklasifikasikan sampah menjadi kategori sampah basah dan sampah kering untuk mencegah pencampuran yang dapat merusak kualitas sampah yang dapat didaur ulang.

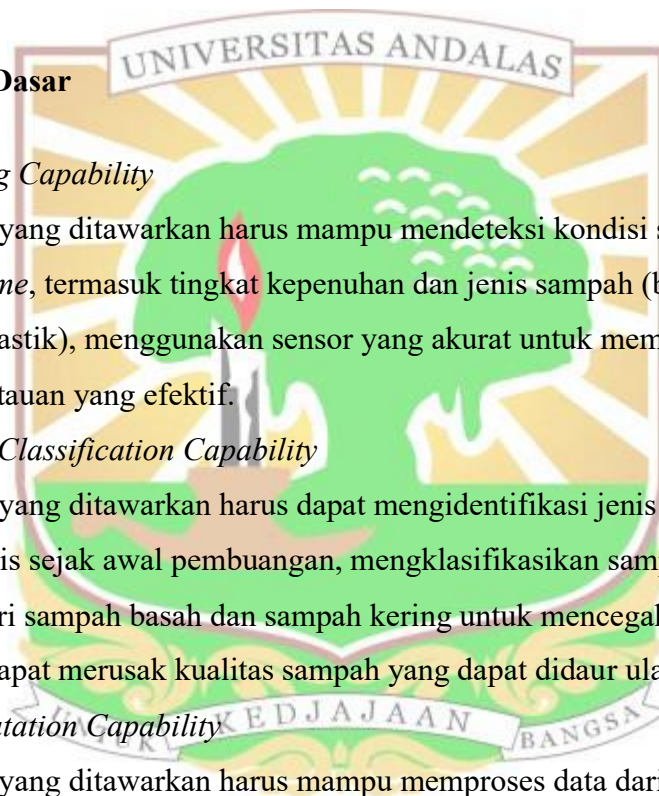
3. *Computation Capability*

Solusi yang ditawarkan harus mampu memproses data dari sensor untuk menentukan status sampah, seperti kepenuhan tempat sampah atau potensi pembusukan, dengan akurasi tinggi. Hal ini memungkinkan pengelolaan sampah yang lebih efisien dan tepat waktu.

4. *Odor Detection and Control Capability*

Solusi yang ditawarkan harus mampu mendeteksi bau tidak sedap yang dihasilkan oleh sampah basah dan secara otomatis mengaktifkan sistem ventilasi atau peringatan jika bau melebihi ambang batas yang ditentukan.

5. *Automatic Category Separation Capability*



Solusi yang ditawarkan harus memiliki mekanisme elektromekanis yang mampu mengarahkan dan memindahkan sampah secara fisik ke kompartemen yang sesuai (Basah, Kering, atau Plastik) secara otomatis berdasarkan hasil klasifikasi, tanpa intervensi manual dari pengguna, guna menjamin ketepatan identifikasi dan kemudahan penggunaan.'

1.2.1.2 Fitur Tambahan

1. *Cost < Rp 5.000.000*

Solusi yang ditawarkan harus dirancang dengan biaya implementasi yang rendah, menggunakan perangkat keras dan perangkat lunak yang terjangkau namun tetap berkualitas, memungkinkan penerapan yang luas di area kampus.

2. *All-in-One Design*

Solusi yang ditawarkan harus memiliki desain yang terpadu dan dapat dipasang dengan mudah di berbagai tempat, tanpa mengganggu kenyamanan pengguna atau estetika lingkungan kampus.

3. *Hygiene and Safety Oriented*

Solusi yang ditawarkan harus dirancang untuk meminimalkan kontak langsung pengguna dengan sampah dan mengurangi penyebaran bau atau cairan lindi, menjaga kebersihan dan kenyamanan lingkungan kampus.

4. *Durability*

Solusi yang ditawarkan harus tahan terhadap kondisi lingkungan kampus yang dinamis, seperti kelembaban, debu, dan potensi benturan, memastikan keandalan sistem dalam jangka panjang.

5. *Completed in Less Than 6 Months*

Solusi yang ditawarkan harus dapat dirancang, dikembangkan, diuji, dan diimplementasikan dalam waktu kurang dari 6 bulan, memastikan keberhasilan proyek dalam jangka waktu yang realistis dan efisien.

1.2.2 Usulan Solusi

1.2.2.1 Solusi 1: Rancang Bangun Tempat Sampah Pintar Berbasis Visi Komputer dan Multisensor Untuk Identifikasi, Pemantauan, Dan Pengolahan Awal Sampah

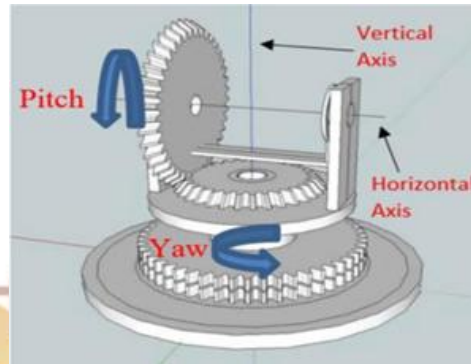
Solusi yang diusulkan merupakan rancang bangun Smart Bin adaptif yang dirancang sebagai satu kesatuan sistem pengolahan awal sampah di lingkungan kampus. Sistem ini mengintegrasikan beberapa fungsi utama, yaitu identifikasi jenis sampah, estimasi volume, perataan timbunan, dan deteksi awal kondisi pembusukan, yang seluruhnya bekerja secara otomatis di dalam satu unit tempat sampah. Pendekatan ini bertujuan untuk mengendalikan kondisi sampah sejak pertama kali dibuang, sebelum terjadi penumpukan tidak teratur yang dapat mempercepat pembusukan dan menurunkan kenyamanan lingkungan.

Arsitektur sistem tidak bertumpu pada satu jenis sensor atau metode tunggal, melainkan menggunakan validasi silang antar sensor untuk merepresentasikan kondisi sampah secara lebih akurat. Setiap keputusan sistem diambil berdasarkan kombinasi data visual dan data sensor fisik, sehingga sistem bersifat adaptif terhadap variasi bentuk, jenis, dan distribusi sampah yang masuk.

Pada tahap awal, identifikasi sampah dilakukan menggunakan kamera statis yang ditempatkan pada jalur masuk sampah dengan kondisi pencahayaan dan latar belakang yang terkontrol. Kamera berfungsi untuk menangkap citra sampah sesaat sebelum bercampur dengan sampah lain di dalam wadah. Proses klasifikasi dilakukan secara langsung pada perangkat melalui jaringan saraf konvolusional (CNN) menggunakan skema *edge computing*, karena proses transfer data visual ke server eksternal memerlukan daya komputasi dan energi yang besar.

CNN bekerja dengan mengekstraksi fitur-fitur penting dari citra input, seperti tekstur, bentuk, dan warna. Fitur-fitur tersebut kemudian diproses melalui beberapa

lapisan konvolusi dan pooling untuk menghasilkan representasi yang digunakan dalam tahap klasifikasi. Model CNN dapat dilatih untuk mengenali pola-pola semacam ini dari ribuan contoh gambar, sehingga mampu melakukan klasifikasi secara otomatis dan konsisten[12].



Gambar 1.1 Dual-Axis Gimbal [13]

Sistem identifikasi pada solusi ini terdiri atas tiga kompartemen klasifikasi, yaitu ruang untuk limbah organik, limbah an organik, dan limbah plastik. Proses identifikasi dimulai setelah hasil klasifikasi dari mikrokontroler diteruskan ke motor aktuator. Dua katup dikendalikan secara terkoordinasi oleh sistem aktuasi: katup pertama berfungsi sebagai mekanisme antrean (*queue system*) dengan prinsip *First In First Out* (FIFO), memastikan setiap objek diproses satu per satu sesuai urutan masuk. Ketika kompartemen klasifikasi telah siap, katup pertama terbuka untuk melewatkan objek ke tahap berikutnya. Selanjutnya, katup kedua yang digerakkan oleh aktuator 2 sumbu (*dual-axis motor*) akan berputar sesuai hasil identifikasi untuk mengarahkan objek ke kompartemen yang sesuai.

Setelah proses identifikasi, sistem melakukan estimasi volume sampah di dalam wadah menggunakan sensor ultrasonik. Sensor ini mengukur jarak antara permukaan sampah dan bagian atas wadah untuk memperkirakan tingkat kepenuhan. Untuk mengurangi kesalahan pengukuran akibat permukaan sampah yang tidak rata atau kemiringan timbunan, mekanisme pemerataan digunakan untuk meratakan permukaan sampah. Dengan alur tersebut, sistem memperoleh estimasi volume yang lebih mendekati kondisi aktual di dalam tempat sampah.

Berdasarkan hasil estimasi volume dan analisis distribusi sampah, sistem kemudian menentukan kebutuhan perataan timbunan. Perataan dilakukan menggunakan mekanisme aktuator mekanik yang dikendalikan secara adaptif. Aktivasi aktuator tidak dilakukan secara terus-menerus, melainkan hanya ketika sistem mendeteksi adanya ketidakseimbangan distribusi sampah atau potensi pemanfaatan ruang yang belum optimal. Keputusan perataan diambil setiap sensor kapasitas mendeteksi sampah dan bentuk khusus dari sampah tersebut. Dengan pendekatan ini, perataan berfungsi untuk mengoptimalkan kapasitas tampung tanpa memberikan tekanan berlebih yang dapat merusak struktur wadah atau mempercepat degradasi sampah.

Selain itu, sistem dilengkapi dengan mekanisme netralisasi bau aktif yang dikendalikan oleh kecerdasan buatan berbasis *Fuzzy Logic*. Sistem pemantauan kualitas udara menggunakan kombinasi sensor gas untuk mendeteksi konsentrasi senyawa penyebab bau dan sensor lingkungan untuk memantau suhu internal wadah, mengingat suhu panas dapat mempercepat aktivitas bakteri pembusuk. Data dari kedua sensor tersebut diolah oleh unit pemroses utama menggunakan aturan *Fuzzy (Rule Base)* untuk menentukan durasi penyemprotan desinfektan secara presisi. Sebagai contoh, durasi penyemprotan akan disesuaikan menjadi lebih lama jika terdeteksi bau menyengat pada suhu tinggi, dan lebih singkat pada suhu rendah, guna efisiensi penggunaan cairan.

Proses netralisasi dilakukan menggunakan pompa bertekanan yang terhubung dengan penyemprot kabut mikro (*micro-mist nozzle*). Penggunaan komponen penyemprot ini memastikan cairan desinfektan keluar dalam bentuk kabut halus (*mist*), bukan butiran air, sehingga efektif menetralsir udara tanpa membasahi sampah secara berlebihan. Untuk mengatasi karakteristik sensor gas yang rentan terhadap interferensi uap kimia, sistem menerapkan algoritma *Post-Spray Cooldown*. Setelah penyemprotan, sistem akan menonaktifkan pembacaan sensor untuk sementara waktu guna membiarkan uap desinfektan mengendap. Hal ini bertujuan mencegah kesalahan pembacaan sistem dimana sensor mendeteksi aroma desinfektan sebagai indikasi bau busuk. Ventilasi wadah juga dilengkapi media filter berpori untuk mengatur tekanan udara tanpa melepas bau keluar.

Secara keseluruhan, solusi ini merepresentasikan Smart Bin terintegrasi yang berfokus pada pengolahan awal sampah di dalam satu unit sistem. Integrasi antara computer vision sederhana, multi-sensor fisik, dan logika pengambilan keputusan adaptif memungkinkan sistem bekerja secara mandiri, efisien, dan realistis untuk diterapkan di lingkungan kampus, sekaligus menjadi solusi yang paling komprehensif dibandingkan alternatif lainnya.

1.2.2.2 Solusi 2: Rancang Bangun Tempat Sampah Pintar Berbasis Sensor Proximity dan Logika Fuzzy untuk Pengolahan Awal Sampah

Solusi yang diusulkan pada alternatif ini adalah rancang bangun Smart Bin berbasis sensor non-visual yang bekerja secara otomatis untuk melakukan pengolahan awal sampah di lingkungan kampus. Sistem ini dirancang sebagai satu unit tempat sampah cerdas yang mengandalkan sensor proximity untuk mengendalikan kondisi sampah sejak tahap pembuangan awal. Pendekatan ini bertujuan untuk mengatasi permasalahan pencampuran jenis sampah, ketidakterkendalian volume, penumpukan timbunan, serta munculnya bau tidak sedap akibat pembusukan sampah organik, dengan sistem yang relatif sederhana, stabil, dan mudah dirawat.

Pendekatan proximity dipilih untuk mengurangi ketergantungan terhadap kondisi pencahayaan, kestabilan visual, serta kompleksitas komputasi. Dengan memanfaatkan karakteristik fisik material sampah, sistem diharapkan mampu bekerja secara konsisten dalam berbagai kondisi lingkungan.

Pada tahap awal, proses identifikasi sampah dilakukan menggunakan kombinasi beberapa sensor proximity dan sensor berat (*load cell*) yang ditempatkan pada jalur masuk sampah. Sensor induktif digunakan untuk mendeteksi keberadaan material logam, sedangkan sensor kapasitif berfungsi untuk mengidentifikasi material non-logam berdasarkan perubahan kapasitansi. Selain itu, sensor berat digunakan untuk memperkirakan massa sampah yang masuk sebagai indikasi kepadatan material. Data dari ketiga sensor tersebut diproses secara bersamaan menggunakan logika *fuzzy* batas untuk mengklasifikasikan sampah ke dalam kategori sampah basah dan sampah kering. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi dilakukan berdasarkan sifat fisik material, tanpa bergantung pada ciri visual sampah.

Setelah proses identifikasi, sistem melakukan estimasi tingkat kepenuhan wadah menggunakan sensor jarak, seperti sensor ultrasonik atau sensor inframerah. Sensor ini mengukur jarak antara permukaan sampah dan bagian atas wadah untuk menentukan volume relatif sampah di dalam tempat penampungan. Untuk meningkatkan kestabilan pembacaan, sistem tidak menggunakan satu kali pengukuran, melainkan melakukan pengambilan data secara periodik dan menghitung nilai rata-rata dari beberapa siklus pengukuran. Dengan cara ini, fluktuasi data akibat bentuk permukaan sampah yang tidak rata dapat diminimalkan, sehingga estimasi volume lebih representatif terhadap kondisi aktual.

Berdasarkan hasil estimasi volume tersebut, sistem menentukan kebutuhan perataan timbunan sampah. Perataan dilakukan menggunakan mekanisme mekanik sederhana yang digerakkan oleh motor penggerak. Aktivasi mekanisme perataan dilakukan secara bersyarat, yaitu hanya ketika tingkat kepenuhan sampah telah melewati ambang batas tertentu. Perataan tidak dilakukan secara kontinu, melainkan terbatas pada upaya penataan ulang timbunan agar ruang penampungan dapat dimanfaatkan secara lebih optimal. Pendekatan ini dirancang untuk meningkatkan kapasitas tampung tanpa menimbulkan tekanan mekanik berlebih yang berpotensi merusak struktur wadah.

Selain pengendalian volume dan distribusi sampah, sistem ini juga dilengkapi dengan mekanisme pendeteksian bau sebagai indikator awal terjadinya pembusukan sampah organik. Pendeteksian bau dilakukan menggunakan sensor gas yang mampu mendeteksi peningkatan konsentrasi senyawa hasil dekomposisi, seperti amonia dan hidrogen sulfida. Sensor gas memantau kondisi udara di dalam wadah secara kontinu. Ketika konsentrasi gas terdeteksi melebihi nilai ambang tertentu, kondisi tersebut diinterpretasikan sebagai indikasi awal pembusukan. Informasi ini digunakan oleh sistem untuk melakukan tindakan awal, seperti aktivasi ventilasi pasif atau pemberian sinyal kondisi penuh, tanpa melibatkan sistem pemantauan lanjutan.

Secara keseluruhan, solusi ini merepresentasikan tempat sampah pintar berbasis sensor *proximity* terintegrasi yang berfokus pada pengolahan awal sampah berbasis

sensor fisik. Dengan mengandalkan sensor material, sensor jarak, dan sensor gas, sistem ini menawarkan pendekatan alternatif yang lebih sederhana dan robust dibandingkan solusi berbasis visual, sehingga layak dipertimbangkan sebagai pembanding dalam analisis HoQ terhadap solusi utama.

1.2.2.3 Solusi 3: Rancang Bangun Tempat Sampah Pintar Berbasis Sensor pada Lingkungan dan Logika Kondisi Otomatis

Solusi alternatif ketiga yang diusulkan adalah rancang bangun tempat sampah pintar berbasis sensor lingkungan dan logika kondisi otomatis yang berfokus pada pengolahan awal sampah secara mandiri di dalam satu unit tempat sampah. Sistem ini dirancang untuk bekerja tanpa memerlukan interaksi aktif dari pengguna maupun teknologi kompleks seperti pengolahan citra. Kecerdasan sistem dicapai melalui kemampuan merespons perubahan kondisi internal tempat sampah secara adaptif menggunakan sensor lingkungan dan logika pengambilan keputusan berbasis kondisi.

Pendekatan ini ditujukan untuk menghasilkan sistem yang relatif sederhana secara komputasi, namun tetap mampu mengendalikan kondisi sampah sejak tahap awal pembuangan, khususnya dalam hal pemisahan dasar sampah, pengendalian volume, penataan timbunan, serta mitigasi awal potensi bau akibat pembusukan.

Pada tahap awal, identifikasi sampah dilakukan secara pasif menggunakan sensor kelembaban yang ditempatkan pada area masuk sampah. Sensor ini berfungsi untuk mendeteksi karakteristik fisik sampah berdasarkan kadar kelembaban yang terbawa saat sampah dibuang. Sampah dengan tingkat kelembaban tinggi diinterpretasikan sebagai sampah basah yang cenderung bersifat organik, sedangkan sampah dengan kelembaban rendah dikategorikan sebagai sampah kering yang umumnya bersifat anorganik. Berdasarkan hasil pembacaan sensor tersebut, mekanisme pengarah internal akan mengalihkan sampah ke kompartemen yang sesuai. Pendekatan ini memungkinkan pemisahan dasar sampah organik dan non-organik tanpa identifikasi visual dan tanpa keterlibatan pengguna secara langsung.

Setelah sampah masuk ke masing-masing kompartemen, sistem melakukan pengukuran tingkat keterisian menggunakan sensor ketinggian internal yang bekerja secara periodik. Sensor ini memantau perubahan ketinggian timbunan sampah untuk memperkirakan volume relatif pada setiap kompartemen. Selain sebagai indikator kepenuhan, data ketinggian yang dikumpulkan secara berkelanjutan dimanfaatkan untuk mengamati laju pertambahan sampah dari waktu ke waktu. Informasi ini digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan internal sistem, seperti penyesuaian mekanisme perataan atau indikasi awal kondisi mendekati penuh.

Berdasarkan hasil pengukuran volume dan pola pertambahan sampah, sistem mengaktifkan mekanisme perataan sampah secara adaptif. Perataan dilakukan menggunakan aktuator bermotor yang berfungsi menyebarkan timbunan sampah di dalam kompartemen agar distribusinya lebih merata. Aktivasi mekanisme ini tidak didasarkan pada interval waktu tetap, melainkan pada kondisi aktual yang terdeteksi oleh sensor volume, seperti penumpukan pada satu sisi atau kenaikan volume yang tidak merata. Dengan pendekatan ini, kapasitas tempat sampah dapat dimanfaatkan secara lebih optimal tanpa melakukan perataan berlebihan yang dapat meningkatkan konsumsi energi atau mempercepat kerusakan mekanik.

Selain pengendalian distribusi dan volume, sistem ini juga dilengkapi dengan mekanisme pendeteksian awal potensi bau sampah. Pendeteksian dilakukan menggunakan kombinasi sensor suhu dan kelembaban yang dipasang di dalam wadah. Peningkatan suhu dan kelembaban diinterpretasikan sebagai indikator awal terjadinya proses pembusukan biologis pada sampah organik. Pendekatan ini memanfaatkan hubungan alami antara pembusukan, suhu, dan kelembaban tanpa memerlukan sensor gas khusus. Ketika kondisi tersebut terdeteksi, sistem secara otomatis mengaktifkan kipas ventilasi untuk menjaga sirkulasi udara di dalam wadah dan menekan potensi munculnya bau tidak sedap.

Secara keseluruhan, solusi ini merepresentasikan tempat sampah pintar berbasis respon lingkungan yang mengandalkan sensor sederhana dan logika kondisi otomatis. Sistem ini menawarkan pendekatan yang lebih minimalis namun fungsional dalam pengolahan awal sampah, sehingga dapat dijadikan alternatif

pembandingan terhadap solusi lain yang menggunakan teknologi lebih kompleks. Dengan karakteristik tersebut, Solusi 3 menempatkan kecerdasan pada kemampuan adaptasi sistem terhadap kondisi internal, bukan pada intensitas komputasi atau interaksi eksternal.

1.2.3 Analisis Usulan Solusi

Berikut merupakan analisis usulan solusi menggunakan House of Quality untuk kebutuhan dari solusi yang diajukan

Tabel 1.4 House of Quality

House of Quality			↑	↑	↑	↓	↑	
 = Hubungan Kuat (5)  = Hubungan Biasa (3)  = Hubungan Kurang (1)  = Tidak Ada Hubungan (0)  = Prioritas  = Tidak Prioritas	Importance a Rating	percent of Importance Rating	Sensing Capability	Automatic Category Separation Capability	Waste Classification Capability	Computation Capability	Odor Detection & Control Capability	Jumlah
Cost < Rp 5.000.000	5	23,8%						
All-in-One Design	2	9,5%						

Hygiene & Safety Oriented	5	23,8%						
Durability	4	19%						
Completed In Less Than 6 Month	5	23,8%						
Jumlah	21	100%						
Importance Rating			58	81	69	20	60	288
Percent of Importance			20,14 %	28,1%	23,96 %	6,94%	20,83 %	100%
Solusi 1								3,663
Solusi 2								3,1
Solusi 3								2,14

Berdasarkan analisa dengan menggunakan HoQ dari 3 usulan solusi yang diberikan, didapatkan rincian hasil HoQ sebagai berikut:

Solusi 1: $(5 \times 20,14\%) + (5 \times 28,13\%) + (3 \times 6,94\%) + (5 \times 20,83\%)$

$$= 1,007 + 1,4065 + 0,2082 + 1,0415 = 3,6632$$

Solusi 2: $(5 \times 20,14\%) + (3 \times 28,13\%) + (3 \times 6,94\%) + (5 \times 20,83\%)$

$$= 1,007 + 0,8439 + 0,2082 + 1,0415 = 3,1006$$

Solusi 3: $(3 \times 20,14\%) + (3 \times 28,13\%) + (1 \times 6,94\%) + (3 \times 20,83\%)$

$$= 0,6042 + 0,8439 + 0,0694 + 0,6249 = 2,1424$$

1. Low Cost

- Sensing Capability (Hubungan Biasa)

Sensing capability memiliki hubungan sedang terhadap aspek *low cost* karena sistem pengelolaan sampah memerlukan beberapa sensor fisik seperti kamera, sensor jarak, dan sensor gas untuk merepresentasikan kondisi sampah secara akurat. Penggunaan sensor-sensor tersebut memang menambah biaya perangkat keras, namun masih berada dalam kisaran biaya yang wajar karena tidak memerlukan sensor industri berpresisi tinggi atau sistem proprietary. Oleh karena itu, meskipun sensing merupakan elemen penting bagi kinerja sistem, kontribusinya terhadap peningkatan biaya bersifat moderat dan masih dapat diterima untuk skala implementasi kampus.

- Waste Classification Capability (Hubungan Biasa)

Waste classification capability memiliki hubungan biasa dengan *low cost* karena proses klasifikasi dirancang menggunakan pendekatan komputasi ringan dan logika berbasis aturan yang dikombinasikan dengan pemrosesan citra sederhana. Pendekatan ini menghindari penggunaan model pembelajaran mesin berskala besar atau infrastruktur komputasi mahal. Namun demikian, kebutuhan perangkat keras pendukung seperti kamera dan unit pemrosesan tetap menjadi faktor biaya yang tidak dapat dieliminasi sepenuhnya.

- Computation Capability (Hubungan Kurang)

Hubungan computation capability terhadap *low cost* tergolong lemah karena sistem dirancang untuk berjalan pada unit komputasi kelas embedded tanpa memerlukan akselerator khusus seperti GPU diskrit. Kompleksitas komputasi bukan merupakan faktor utama penentu biaya sistem, karena biaya implementasi lebih dipengaruhi oleh jumlah sensor, aktuator, serta mekanisme mekanik yang digunakan.

- Odor Detection and Control Capability (Hubungan Biasa)

Odor detection and control capability memiliki hubungan biasa dengan *low cost* karena penggunaan sensor gas menambah komponen perangkat keras tambahan. Namun, sensor gas yang digunakan merupakan sensor umum dengan harga relatif rendah dan mudah diperoleh di pasaran. Penambahan biaya ini dianggap sepadan karena fungsi deteksi bau berperan penting dalam menjaga aspek higienitas dan kenyamanan lingkungan kampus, tanpa menyebabkan lonjakan biaya yang signifikan.

2. All-in-One Design

- Sensing Capability (Hubungan Biasa)

Sensing capability memiliki hubungan biasa dengan *All-in-One Design* karena sensor yang digunakan relatif berukuran kecil dan dapat diintegrasikan ke dalam satu unit tempat sampah. Namun, semakin banyak sensor yang ditambahkan akan meningkatkan kompleksitas tata letak internal dan menuntut perancangan mekanik yang lebih cermat agar sistem tetap ringkas.

- Waste Classification Capability (Hubungan Kurang)

Waste classification capability memiliki hubungan lemah terhadap *All-in-One Design* karena proses klasifikasi bersifat logis dan berbasis perangkat lunak, sehingga tidak memerlukan penambahan komponen fisik yang signifikan di dalam sistem.

- Computation Capability (Hubungan Biasa)

Computation capability memiliki hubungan biasa dengan *All-in-One Design* karena pemilihan unit komputasi seperti single-board computer mempengaruhi dimensi fisik sistem. Meskipun demikian, pengaruhnya tidak bersifat drastis dan masih memungkinkan integrasi dalam desain tempat sampah yang ringkas.

- Odor Detection and Control Capability (Tidak Ada Hubungan)

Odor detection and control capability tidak memiliki hubungan langsung dengan *All-in-One Design* karena sensor gas dapat ditempatkan secara fleksibel di dalam wadah tanpa memengaruhi dimensi utama sistem.

3. Hygiene and Safety Oriented

- Sensing Capability (Hubungan Kuat)

Sensing capability memiliki hubungan kuat terhadap aspek *hygiene and safety* karena kemampuan mendeteksi kondisi sampah secara akurat menjadi dasar dalam mencegah penumpukan, pembusukan, dan potensi kontaminasi yang dapat menimbulkan bau serta risiko kesehatan.

- Waste Classification Capability (Hubungan Kuat)

Waste classification capability memiliki hubungan kuat dengan *hygiene and safety* karena identifikasi sampah sejak awal pembuangan mencegah terjadinya kontaminasi silang antara sampah basah dan sampah kering, sehingga menjaga kebersihan dan kualitas lingkungan kampus.

- Computation Capability (Tidak Ada Hubungan)

Computation capability tidak berhubungan langsung dengan aspek higienitas karena berfungsi sebagai pemroses data dan pengambil keputusan, bukan sebagai faktor yang secara langsung memengaruhi kondisi fisik dan kebersihan sistem.

- Odor Detection and Control Capability (Hubungan Kuat)

Odor detection and control capability memiliki hubungan sangat kuat dengan *hygiene and safety* karena deteksi bau merupakan indikator langsung terjadinya pembusukan sampah yang berpotensi mengganggu kesehatan dan kenyamanan lingkungan kampus.

4. Durability

- Sensing Capability (Hubungan Biasa)

Sensing capability memiliki hubungan biasa terhadap *durability* karena sensor harus mampu bertahan terhadap kondisi lingkungan seperti kelembaban, debu, dan paparan sampah. Ketahanan sensor berkontribusi terhadap umur pakai sistem, meskipun bukan satu-satunya faktor penentu.

- Waste Classification Capability (Tidak Ada Hubungan)

Waste classification capability tidak memiliki hubungan langsung dengan

durability karena bersifat perangkat lunak dan tidak dipengaruhi oleh kondisi fisik lingkungan.

- Computation Capability (Hubungan Kurang)

Computation capability memiliki hubungan lemah dengan *durability* karena unit komputasi umumnya memiliki umur pakai yang panjang selama dioperasikan dalam batas suhu dan kelistrikan yang aman.

- Odor Detection and Control Capability (Hubungan Biasa)

Odor detection capability memiliki hubungan biasa dengan *durability* karena sensor gas memiliki umur pakai terbatas dan memerlukan kalibrasi atau penggantian secara berkala.

5. Completed in Less Than 6 Months

- Sensing Capability (Tidak Ada Hubungan)

Sensing capability tidak memiliki hubungan langsung dengan durasi penyelesaian proyek karena sebagian besar sensor yang digunakan telah tersedia di pasaran dan dapat diperoleh dengan mudah.

- Waste Classification Capability (Hubungan Biasa)

Waste classification capability memiliki hubungan sedang dengan waktu penyelesaian proyek karena implementasi dan pengujian logika klasifikasi memerlukan iterasi dan penyesuaian, namun tidak melibatkan pengembangan algoritma kompleks jangka panjang.

- Computation Capability (Hubungan Kurang)

Computation capability memiliki hubungan lemah dengan durasi proyek karena komputasi yang digunakan bersifat ringan dan tidak memerlukan proses pelatihan atau optimasi yang memakan waktu lama.

- Odor Detection and Control Capability (Tidak Ada Hubungan)

Odor detection and control capability tidak berpengaruh signifikan terhadap waktu penyelesaian proyek karena sensor gas dapat langsung diintegrasikan tanpa memerlukan pengembangan algoritma tambahan yang kompleks.

6. Solusi 1 Smart Bin Multi-Sensor Terintegrasi

- Sensing Capability (Hubungan Kuat)
Solusi 1 memiliki hubungan kuat dengan sensing capability karena sistem ini mengandalkan kombinasi kamera, sensor jarak, dan sensor gas untuk merepresentasikan kondisi sampah secara menyeluruh.
 - Waste Classification Capability (Hubungan Kuat)
Solusi ini memiliki hubungan kuat dengan waste classification capability karena identifikasi sampah dilakukan secara eksplisit sejak tahap awal pembuangan menggunakan informasi visual dan logika berbasis aturan.
 - Computation Capability (Hubungan Biasa)
Solusi 1 memiliki hubungan sedang dengan computation capability karena memerlukan pemrosesan data sensor dan citra sederhana tanpa algoritma komputasi berat.
 - Odor Detection and Control Capability (Hubungan Kuat)
Solusi 1 memiliki hubungan kuat dengan odor detection and control capability karena deteksi bau dilakukan secara langsung menggunakan sensor gas sebagai indikator pembusukan.
7. Solusi 2 Smart Bin Sensor Non-Visual
- Sensing Capability (Hubungan Kuat)
Solusi 2 memiliki hubungan kuat dengan sensing capability karena seluruh sistem bergantung pada sensor fisik non-visual.
 - Waste Classification Capability (Hubungan Biasa)
Hubungan dengan waste classification capability tergolong sedang karena klasifikasi dilakukan berdasarkan sifat fisik material yang terdeteksi sensor.
 - Computation Capability (Hubungan Biasa)
Solusi ini memiliki hubungan biasa dengan computation capability karena pengolahan data dilakukan menggunakan logika ambang batas dan penggabungan sensor sederhana.
 - Odor Detection and Control Capability (Hubungan Kuat)
Deteksi bau pada Solusi 2 dilakukan secara langsung menggunakan sensor gas sehingga memiliki hubungan kuat dengan fitur ini.

8. Solusi 3 Smart Bin Berbasis Sensor Lingkungan

- Sensing Capability (Hubungan Sedang)

Solusi 3 memiliki hubungan sedang dengan sensing capability karena sensor yang digunakan terbatas pada sensor lingkungan.

- Waste Classification Capability (Hubungan Kurang)

Hubungan terhadap waste classification capability tergolong lemah karena identifikasi hanya berdasarkan indikasi lingkungan seperti kelembaban.

- Computation Capability (Hubungan Kurang)

Solusi 3 memiliki hubungan lemah dengan computation capability karena logika sistem sangat sederhana.

- Odor Detection and Control Capability (Hubungan Sedang)

Deteksi bau pada Solusi 3 bersifat inferensial, sehingga hubungannya tergolong sedang.

1.2.4 Solusi yang dipilih

Berdasarkan hasil analisis House of Quality (HoQ), pemilihan solusi didasarkan pada tingkat pemenuhan terhadap fitur dasar dan fitur tambahan yang menjadi kebutuhan utama sistem pengelolaan sampah di lingkungan kampus. Analisis tidak hanya mempertimbangkan keunggulan teknis, tetapi juga aspek implementasi dan relevansinya terhadap permasalahan pengelolaan sampah sejak tahap awal pembuangan.

Hasil HoQ menunjukkan bahwa Solusi 1 (Smart Bin Multi-Sensor Terintegrasi) memiliki tingkat pemenuhan tertinggi dan paling seimbang dibandingkan dua solusi lainnya. Solusi ini menunjukkan hubungan kuat terhadap fitur inti sistem, khususnya *sensing capability*, *waste classification capability*, dan *odor detection and control capability*, yang secara langsung menjawab permasalahan pencampuran sampah dan pembusukan di sumber.

Keunggulan utama Solusi 1 terletak pada pendekatan multi-sensor, yang mengombinasikan sensor visual, sensor jarak, dan sensor gas untuk merepresentasikan kondisi sampah secara lebih akurat dan kontekstual. Pendekatan

ini menjadi dasar pengambilan keputusan sistem yang lebih andal, baik dalam identifikasi sampah maupun deteksi dini kondisi pembusukan.

Pada aspek identifikasi, Solusi 1 mampu melakukan klasifikasi sampah secara eksplisit sejak awal pembuangan menggunakan informasi visual yang diproses dengan logika berbasis aturan. Kemampuan ini efektif dalam mencegah kontaminasi silang antara sampah basah dan kering, sehingga meningkatkan kualitas sampah yang berpotensi dimanfaatkan kembali. Selain itu, penggunaan sensor gas memungkinkan deteksi bau secara langsung sebagai indikator awal pembusukan, yang mendukung aspek higienitas dan kesehatan lingkungan kampus.

Meskipun Solusi 1 bukan yang paling unggul pada setiap aspek tambahan seperti biaya atau desain paling sederhana, tingkat pemenuhannya masih berada pada kategori realistis untuk diterapkan di lingkungan kampus. Sebaliknya, Solusi 2 memiliki keterbatasan pada presisi klasifikasi, sementara Solusi 3 tidak mampu memenuhi fitur dasar secara komprehensif. Oleh karena itu, Solusi 1 dipilih sebagai solusi utama karena paling selaras dengan tujuan sistem, yaitu mengendalikan kondisi sampah sejak tahap awal pembuangan melalui identifikasi yang akurat, deteksi pembusukan yang andal, dan pengambilan keputusan otomatis.

