

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan Masalah

Lingkungan kampus memiliki tingkat aktivitas harian yang cukup tinggi, meliputi kegiatan perkuliahan, administrasi, serta aktivitas mahasiswa dan tenaga kependidikan. Berbagai aktivitas tersebut secara langsung berkontribusi terhadap timbulan sampah dalam jumlah yang cukup besar. Berdasarkan data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) tahun 2023, komposisi sampah di Indonesia masih didominasi oleh sisa makanan sebesar 41,6% dan plastik sebesar 18,7% [1]. Kondisi serupa juga dapat ditemukan di lingkungan kampus, karena aktivitas civitas akademika di kantin, ruang administrasi, maupun area publik menghasilkan berbagai jenis sampah dengan karakteristik yang beragam.

Meskipun demikian, pengelolaan sampah di sejumlah lingkungan kampus masih dilakukan dengan metode konvensional dan belum menerapkan pemilahan sejak dari sumber. Kondisi tersebut dapat dipengaruhi oleh kebijakan pengelolaan sampah yang belum diterapkan secara menyeluruh, keterbatasan sosialisasi, serta belum kuatnya struktur kelembagaan dalam pengelolaan sampah di lingkungan kampus. Studi menunjukkan bahwa kebijakan pengelolaan sampah masih berada pada tahap perumusan dan belum tersosialisasi secara optimal kepada petugas kebersihan maupun sivitas akademika.

Salah satu permasalahan utama dalam kondisi tersebut adalah belum terlaksananya pemilahan sampah sejak dari sumber. Sampah organik yang memiliki karakteristik basah dan mudah mengalami pembusukan sering kali tercampur dengan sampah plastik serta material anorganik lainnya. Pencampuran tersebut dapat menyebabkan kontaminasi silang yang menurunkan kualitas material yang sebenarnya masih memiliki potensi untuk dimanfaatkan kembali. Dengan demikian, meskipun material tersebut masih memiliki nilai secara kuantitas, kontaminasi yang terjadi dapat menyebabkan kualitasnya menurun sehingga sulit untuk dimanfaatkan atau didaur ulang [3].

Tabel 1.1 Dampak Pencampuran Sampah Terhadap Potensi Daur Ulang

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 permasalahan pemilahan, tidak adanya pemantauan terhadap volume dan kondisi sampah juga memperburuk pengelolaannya. Tempat sampah di lingkungan kampus pada umumnya belum dilengkapi sistem untuk memantau tingkat keterisian, sehingga sampah dapat terus menumpuk hingga mencapai kapasitas maksimum atau bahkan meluap. Kondisi tersebut dapat mempercepat pembusukan sampah basah dan menyebabkan kontaminasi terhadap sampah kering di sekitarnya. Akibatnya, kualitas sampah yang masih berpotensi untuk dimanfaatkan kembali dapat mengalami penurunan [3].

Permasalahan lainnya berkaitan dengan proses pembusukan sampah organik yang tidak terkendali. Sampah organik yang dibiarkan menumpuk dalam waktu lama akan mengalami dekomposisi biologis yang dapat menghasilkan bau tidak sedap serta cairan lindi. Kondisi tersebut tidak hanya mengurangi kenyamanan di lingkungan kampus, tetapi juga menunjukkan bahwa pengelolaan sampah pada tahap awal pembuangan belum berlangsung secara optimal. Proses pembusukan yang terjadi juga dapat menurunkan kualitas sampah yang telah tercampur, sehingga mengurangi peluang untuk dimanfaatkan kembali.

Di samping permasalahan teknis, tingkat kesadaran dan kedisiplinan sivitas akademika dalam membuang sampah sesuai dengan jenisnya turut memengaruhi rendahnya pemanfaatan kembali sampah [5]. Apabila tidak didukung oleh sistem pemilahan yang jelas dan mudah digunakan, kebiasaan membuang berbagai jenis sampah secara tercampur akan sulit diubah. Hal ini menunjukkan bahwa rendahnya tingkat pemanfaatan kembali sampah tidak hanya berkaitan dengan keterbatasan teknologi pengolahan, tetapi juga dipengaruhi oleh belum optimalnya pengelolaan sejak tahap awal pembuangan.

Berdasarkan kondisi tersebut, dapat diketahui bahwa rendahnya potensi pemanfaatan kembali sampah di lingkungan kampus berkaitan dengan belum efektifnya pengelolaan sejak sumber. Permasalahan tersebut meliputi belum adanya pemilahan awal yang efektif, keterbatasan pemantauan volume, serta pembusukan sampah organik yang belum terkendali. Oleh sebab itu, diperlukan suatu solusi berbasis rekayasa yang dapat membantu mengendalikan kondisi sampah sejak tahap awal pembuangan, sehingga kualitas sampah dapat dipertahankan dan peluang pemanfaatannya pada tahap selanjutnya dapat ditingkatkan.

Penerapan pendekatan yang tepat terhadap permasalahan tersebut diharapkan dapat memberikan dampak positif bagi lingkungan kampus, terutama dalam meningkatkan kebersihan, menjaga kenyamanan dan kesehatan lingkungan, serta mendukung pengelolaan sampah yang lebih berkelanjutan.

1.1.1 Informasi Pendukung Masalah

Berdasarkan hasil pengamatan secara umum, sampah yang banyak ditemukan di lingkungan kampus meliputi sampah organik, plastik, serta berbagai jenis sampah anorganik lainnya. Sampah tersebut pada umumnya masih dibuang langsung ke tempat sampah tanpa melalui proses pemilahan, sehingga berbagai jenis material akhirnya tercampur dalam satu wadah.

Hasil studi mengenai karakteristik sampah di beberapa perguruan tinggi di Indonesia menunjukkan bahwa sampah organik, seperti sisa makanan dan guguran daun, serta sampah anorganik yang memiliki potensi untuk didaur ulang, terutama

kertas dan plastik, merupakan jenis sampah dengan proporsi yang cukup besar. Namun, belum tersedianya sistem pemilahan yang terintegrasi sejak sumber menyebabkan potensi material tersebut untuk didaur ulang mengalami penurunan secara signifikan [6].

Tabel 1.2 Komposisi Rata-rata Timbunan Sampah di Area Kampus di Indonesia

Jenis Sampah	Persentase Berat (%)	Sumber Dominan	Karakteristik Fisik
Organik (Sisa Makanan & Taman)	40% - 55%	Kantin, Sisa Bekal, Taman Kampus	Basah, kadar air tinggi ($\geq 60\%$), 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 menunjukkan bahwa sampah organik, terutama sisa makanan dan sampah dari aktivitas taman, memiliki proporsi yang cukup besar di lingkungan kampus [6]. Selain itu, kertas dan plastik juga menjadi bagian penting dari timbunan sampah karena banyak dihasilkan dari aktivitas perkuliahan, administrasi, dan kegiatan mahasiswa. Apabila berbagai jenis sampah tersebut tidak dikelola dan dipisahkan dengan baik, sampah organik yang memiliki kadar air tinggi dapat tercampur dengan material kering dan mempercepat penurunan kualitas sampah di dalam tempat penampungan [2].

Kondisi tersebut menjadi semakin bermasalah ketika sampah organik dibiarkan menumpuk dalam waktu tertentu. Sampah sisa makanan dan material organik lainnya memiliki karakteristik mudah mengalami pembusukan, terutama ketika berada dalam kondisi lembap dan terkumpul dalam jumlah banyak. Proses pembusukan menghasilkan berbagai senyawa volatil yang dapat menimbulkan bau tidak sedap. Oleh karena itu, permasalahan bau pada tempat sampah tidak hanya berkaitan dengan keberadaan sampah, tetapi juga dipengaruhi oleh kondisi internal tempat sampah, seperti jumlah sampah, kelembapan, suhu, dan lamanya sampah berada di dalam wadah.

Pada tempat sampah konvensional, kondisi tersebut umumnya tidak dipantau secara berkala. Tidak tersedianya mekanisme penginderaan terhadap kondisi udara menyebabkan perubahan kualitas udara di dalam tempat sampah sulit diketahui sebelum bau mulai dirasakan oleh pengguna. Penanganan biasanya dilakukan setelah muncul indikasi yang terlihat atau tercium secara langsung, sehingga tindakan yang diberikan cenderung bersifat reaktif. Kondisi ini menunjukkan adanya kebutuhan terhadap sistem yang dapat memantau perubahan kondisi udara secara lebih terukur sebagai dasar untuk menentukan tindakan pengendalian bau.

Selain tidak adanya pemantauan kondisi udara, penumpukan sampah juga dapat memperburuk permasalahan bau. Ketika volume sampah semakin bertambah, ruang udara di dalam wadah menjadi lebih terbatas dan kondisi lingkungan di sekitar tumpukan dapat berubah. Sampah organik yang berada dalam kondisi lembap dan tertutup berpotensi mengalami pembusukan lebih lanjut sehingga menghasilkan senyawa penyebab bau dalam jumlah yang lebih tinggi. Jika kondisi tersebut tidak diketahui sejak awal, pengendalian bau baru dilakukan setelah gangguan kenyamanan telah terjadi.

Permasalahan lain yang turut memengaruhi kondisi tersebut adalah pencampuran sampah organik dengan sampah lainnya. Sampah basah yang bercampur dengan material kering dapat menyebabkan kontaminasi dan meningkatkan kelembapan pada material di sekitarnya. Kondisi ini tidak hanya menurunkan kualitas sampah yang masih memiliki potensi untuk dimanfaatkan kembali, tetapi juga dapat menciptakan lingkungan yang lebih mendukung terjadinya proses pembusukan.

Dengan demikian, pemilahan sampah dan pengendalian kondisi udara memiliki keterkaitan dalam menjaga kualitas sampah sejak tahap awal pembuangan.

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 [23]. Keberadaan senyawa tersebut dapat digunakan sebagai salah satu indikator perubahan kondisi udara di dalam tempat sampah. Oleh karena itu, pemantauan gas dapat menjadi pendekatan yang lebih objektif dibandingkan hanya mengandalkan persepsi penciuman manusia untuk mengetahui adanya peningkatan kondisi bau.

Suhu dan kelembapan juga menjadi faktor lingkungan yang perlu diperhatikan karena keduanya berkaitan dengan kondisi pembusukan sampah organik. Perubahan kondisi tersebut dapat menyebabkan karakteristik udara di dalam tempat sampah berubah dari waktu ke waktu. Dengan demikian, pemantauan gas bersama parameter lingkungan dapat memberikan informasi yang lebih lengkap mengenai kondisi udara di dalam tempat sampah dan dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan pengendalian bau.

Berdasarkan permasalahan tersebut, dapat diketahui bahwa pengendalian bau pada tempat sampah konvensional masih menghadapi beberapa kendala, yaitu tidak adanya pemantauan kondisi gas secara terukur, perubahan suhu dan kelembapan yang tidak terpantau, penumpukan sampah organik, serta tidak adanya mekanisme pengendalian bau yang dapat menyesuaikan respons terhadap kondisi aktual. Kondisi ini menunjukkan perlunya suatu sistem yang mampu memantau perubahan kualitas udara secara berkala dan memberikan respons pengendalian secara otomatis sesuai dengan tingkat kondisi yang terdeteksi.

Berdasarkan karakteristik sampah tersebut, beberapa tantangan utama dalam pengelolaan sampah di lingkungan kampus dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Dominasi Sampah Organik Basah

Tingginya kandungan air pada sampah organik menyebabkan material tersebut lebih mudah mengalami pembusukan. Apabila tercampur dengan sampah plastik, kondisi tersebut dapat meningkatkan kontaminasi dan membentuk lapisan kotoran atau *biofilm* yang sulit dibersihkan [3].

2. Besarnya Volume Sampah Plastik

Sampah plastik memiliki kontribusi berat sekitar 15–20% dari total timbunan, tetapi memiliki densitas yang rendah sehingga membutuhkan ruang penyimpanan yang relatif besar. Botol dan kemasan plastik dapat memenuhi sebagian besar volume wadah meskipun beratnya belum mencapai kapasitas maksimum. Kondisi ini dapat menyebabkan tempat sampah terlihat penuh sebelum kapasitas sebenarnya tercapai dan berpotensi meningkatkan frekuensi pengangkutan yang kurang efisien secara operasional.

3. Keterbatasan Data *Real-time*

Petugas kebersihan belum memperoleh informasi kondisi tempat sampah secara langsung, khususnya mengenai tingkat keterisian setiap lokasi. Keterbatasan informasi tersebut dapat menyulitkan penentuan prioritas pengangkutan dan menyebabkan rute pengelolaan sampah menjadi kurang efisien.

Oleh sebab itu, diperlukan suatu intervensi yang tidak hanya berfungsi sebagai tempat penampungan, tetapi juga mampu melakukan pemilahan sampah secara otomatis untuk mengurangi risiko kontaminasi sejak awal. Selain itu, sistem perlu dilengkapi dengan mekanisme pemantauan kapasitas agar penumpukan sampah dapat diketahui dan dikendalikan sebelum mencapai kondisi berlebih.

Berdasarkan kondisi tersebut, dapat disimpulkan bahwa rendahnya efektivitas pemilahan dan pemanfaatan kembali sampah di lingkungan kampus berkaitan

dengan belum tersedianya sistem yang mampu mengendalikan kondisi sampah secara terintegrasi sejak tahap awal pembuangan.

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengembangkan pendekatan untuk melakukan pemilahan sampah secara otomatis, baik dengan memanfaatkan sensor sederhana, teknologi *computer vision*, maupun metode *machine learning*. Masing-masing pendekatan memiliki keunggulan dalam meningkatkan kemampuan identifikasi dan efisiensi proses pemilahan. Namun, penerapannya masih memiliki sejumlah keterbatasan teknis, terutama karena karakteristik sampah yang beragam, tidak seragam, dan dapat berubah sesuai dengan kondisi lingkungan. Untuk memberikan gambaran mengenai pendekatan yang telah dikembangkan, Tabel 1.3 menyajikan perbandingan beberapa solusi yang tersedia beserta kelebihan dan keterbatasan masing-masing.

Tabel 1.3 Solusi yang telah ada

No	Solusi	Kelebihan	Kekurangan
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.
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.

3	Pemisah Sampah Logam dan Non-Logam Berbasis Sensor Proximity Menggunakan sensor induktif (logam) dan kapasitif (plastik/kaca) pada conveyor belt untuk memisahkan sampah berdasarkan materialnya.	1. Robust (Tahan Banting): Sensor fisik tidak terpengaruh pencahayaan. 2. Biaya Rendah: Komponen sensor relatif murah dan mudah didapat.	1. Klasifikasi Terbatas: Sulit membedakan sampah organik basah dengan plastik basah. 2. Mekanisme Rumit: Membutuhkan sistem conveyor yang memakan tempat (tidak spread). 3. Sering terjadi kesalahan deteksi pada sampah komposit (campuran).
---	---	--	--

Stakeholder yang terlibat dalam sistem ini terdiri atas beberapa pihak sebagai berikut:

1. Civitas Akademika

Civitas akademika merupakan pengguna utama sistem yang meliputi mahasiswa, dosen, tenaga kependidikan, serta tamu yang melakukan aktivitas di lingkungan kampus. Kelompok ini berperan sebagai pengguna yang menghasilkan sampah setiap hari, sehingga sampah yang dihasilkan menjadi masukan utama bagi sistem.

2. Unit Pengelola Kebersihan dan Fasilitas Kampus

Unit pengelola kebersihan dan fasilitas kampus berperan sebagai operator yang bertanggung jawab terhadap pengoperasian, pemantauan, dan pemeliharaan sistem. Kebutuhan operator terhadap informasi mengenai kondisi tempat sampah menjadi dasar penerapan fitur monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT). Informasi seperti tingkat keterisian dan kondisi bau dapat digunakan untuk membantu menentukan waktu penanganan berdasarkan kondisi aktual, bukan hanya berdasarkan jadwal pengangkutan.

3. Mitra Industri Daur Ulang

Mitra industri daur ulang merupakan pihak eksternal yang menjadi penerima manfaat dari hasil pengelolaan sampah, khususnya material anorganik yang masih memiliki nilai ekonomi seperti plastik. Sampah yang telah dikelola dengan lebih baik berpotensi memiliki kualitas yang lebih sesuai untuk proses pengolahan lebih

lanjut. Keberadaan mitra ini juga dapat mendukung keberlanjutan pengelolaan sampah melalui pemanfaatan dan potensi nilai ekonomi dari material yang berhasil dipisahkan.

1.1.2 Analisis Masalah dan Konstrain

1. Aspek Lingkungan

Pencampuran serta penumpukan sampah dapat menurunkan kualitas lingkungan kampus. Sampah organik yang mengalami pembusukan dapat menimbulkan bau tidak sedap dan berpotensi menarik vektor penyakit, sehingga mengganggu kebersihan dan kenyamanan lingkungan sekitar.

2. Aspek Operasional

Belum tersedianya sistem yang dapat memantau volume dan kondisi sampah menyebabkan proses penanganan masih bersifat reaktif. Kondisi sampah yang terus menumpuk menjadi lebih sulit dikendalikan dan dapat memperburuk keadaan tempat penampungan.

3. Aspek Teknis

Pengelolaan sampah yang masih dilakukan secara manual memiliki keterbatasan dalam menangani keberagaman jenis sampah serta perubahan jumlah timbulan sampah yang terjadi setiap hari. Kondisi tersebut membuat proses pengelolaan kurang efektif dan sulit dilakukan secara konsisten.

4. Aspek Kesehatan

Pembusukan sampah organik dapat menimbulkan berbagai risiko terhadap kesehatan dan lingkungan akibat munculnya bau tidak sedap, cairan lindi, serta potensi kontaminasi. Proses pembusukan yang tidak terkendali juga dapat menghasilkan gas seperti metana (CH_4) dan amonia (NH_3). Selain itu, penumpukan sampah basah dapat menarik lalat dan tikus yang berpotensi menjadi vektor penyebaran penyakit di lingkungan kampus.

5. Aspek Sosial

Rendahnya kesadaran dan kedisiplinan dalam membuang serta memilah sampah sesuai jenisnya menjadi salah satu kendala dalam pengelolaan sampah. Kebiasaan membuang sampah secara tidak sesuai dapat sulit diubah dalam waktu singkat apabila tidak didukung oleh sistem yang dapat membantu pengguna dalam proses pemilahan.

6. Aspek Ekonomi

Pencampuran berbagai jenis sampah dapat menurunkan kualitas material yang masih memiliki potensi untuk didaur ulang. Kondisi tersebut pada akhirnya dapat mengurangi nilai ekonomi material dan bahkan menyebabkan material tertentu tidak lagi memiliki nilai jual.

7. Konstrain Sistem

- a) Sistem dirancang untuk digunakan pada lingkungan kampus.
- b) Sampah yang dimasukkan ke dalam sistem tidak menggunakan kantong plastik.
- c) Sampah yang dimasukkan memiliki ukuran maksimal 15 cm × 15 cm agar dapat melewati lubang *inlet* berdiameter 18 cm dan tidak menghambat mekanisme *spreading*.
- d) Sistem diwujudkan dalam bentuk prototipe dengan perangkat keras dan kemampuan komputasi yang relatif sederhana.
- e) Seluruh proses utama sistem dirancang untuk berjalan secara otomatis tanpa bergantung pada proses pemilahan secara manual oleh pengguna.
- f) Sistem tidak dirancang untuk melakukan klasifikasi sampah plastik berdasarkan jenis resin plastik.

1.1.3 Kebutuhan yang harus dipenuhi

Berdasarkan permasalahan yang telah dianalisis, sistem yang dikembangkan perlu memenuhi beberapa kebutuhan berikut:

1. Sistem mampu mengidentifikasi jenis sampah sejak tahap awal pembuangan.
2. Sistem mampu melakukan pemantauan tingkat keterisian sampah secara otomatis untuk membantu mencegah penumpukan berlebih.
3. Sistem mampu menyebarkan timbunan sampah secara horizontal sehingga ruang yang tersedia di dalam wadah dapat dimanfaatkan secara lebih optimal.
4. Sistem mampu memantau kondisi gas dan lingkungan di dalam tempat sampah yang berpotensi menyebabkan munculnya bau serta melakukan pengendalian bau secara otomatis.
5. Sistem mampu menghasilkan informasi mengenai status dan kondisi sampah secara otomatis.

1.1.4 Tujuan

Berdasarkan kebutuhan sistem yang telah ditetapkan, tujuan yang ingin dicapai dalam perancangan ini adalah:

1. Merancang sistem pengelolaan sampah berbasis rekayasa yang dapat mendukung proses identifikasi sampah sejak tahap awal pembuangan.
2. Mengimplementasikan mekanisme pemantauan kapasitas dan kondisi sampah secara otomatis.
3. Mendukung peningkatan potensi daur ulang dan pemanfaatan kembali sampah melalui pengelolaan awal yang lebih terkontrol dan 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 melakukan pemantauan kondisi sampah secara *real-time* dengan memanfaatkan sensor yang sesuai untuk memperoleh informasi mengenai kondisi dan status sampah secara efektif.

2. Waste Classification Capability

Solusi yang ditawarkan harus mampu melakukan identifikasi dan pengelompokan jenis sampah secara otomatis sejak tahap awal pembuangan untuk membantu mengurangi pencampuran antarjenis sampah dan menjaga kualitas material yang masih dapat dimanfaatkan kembali.

3. Computation Capability

Solusi yang ditawarkan harus mampu mengolah data yang diperoleh dari sensor untuk menentukan kondisi dan status sampah secara otomatis. Kemampuan tersebut diperlukan agar sistem dapat melakukan pengelolaan berdasarkan kondisi yang terdeteksi secara tepat dan efisien.

4. Odor Detection and Control Capability

Solusi yang ditawarkan harus mampu memantau kondisi gas dan lingkungan di dalam tempat sampah untuk mendeteksi perubahan yang berpotensi menimbulkan bau. Data hasil pemantauan tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan untuk mengendalikan bau secara otomatis dan adaptif sesuai dengan kondisi yang terdeteksi.

5. Automatic Category Separation Capability

Solusi yang ditawarkan harus memiliki mekanisme elektromekanis yang mampu mengarahkan dan memindahkan sampah secara otomatis ke kompartemen yang sesuai berdasarkan hasil identifikasi, sehingga proses pemilahan dapat dilakukan tanpa intervensi manual dari pengguna.

1.2.1.2 Fitur Tambahan

1. Cost < Rp 5.000.000

Solusi yang ditawarkan harus dikembangkan dengan biaya implementasi yang terjangkau melalui penggunaan perangkat keras dan perangkat lunak yang ekonomis namun tetap memenuhi kebutuhan sistem, sehingga dapat diterapkan secara lebih luas di lingkungan kampus.

2. All-in-One Design

Solusi yang ditawarkan harus memiliki rancangan yang terintegrasi dalam satu kesatuan sistem serta dapat ditempatkan pada berbagai lokasi tanpa mengurangi kenyamanan pengguna maupun mengganggu estetika lingkungan kampus.

3. Hygiene and Safety Oriented

Solusi yang ditawarkan harus dirancang untuk mengurangi kontak langsung pengguna dengan sampah serta meminimalkan penyebaran bau dan cairan lindi, sehingga kebersihan, keamanan, dan kenyamanan lingkungan kampus dapat tetap terjaga.

4. Durability

Solusi yang ditawarkan harus memiliki ketahanan terhadap kondisi lingkungan kampus, seperti kelembapan, debu, dan kemungkinan benturan, sehingga sistem dapat beroperasi dengan baik dan andal dalam jangka waktu yang panjang.

5. Completed in Less Than 6 Months

Solusi yang ditawarkan harus dapat melalui seluruh tahapan perancangan, pengembangan, pengujian, dan implementasi dalam waktu kurang dari enam bulan sehingga proses pengembangan dapat diselesaikan secara 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 Smart Bin terintegrasi yang dirancang untuk melakukan pengolahan awal sampah secara otomatis di lingkungan kampus. Sistem menggabungkan beberapa fungsi, yaitu identifikasi jenis sampah, pemantauan volume, pemerataan timbunan, serta pemantauan dan pengendalian kondisi bau. Integrasi tersebut bertujuan untuk mengendalikan kondisi sampah sejak awal pembuangan sehingga penumpukan dan pembusukan yang dapat menimbulkan bau dapat ditangani lebih awal.

Sistem menggunakan kombinasi data dari kamera dan berbagai sensor untuk memperoleh informasi mengenai kondisi sampah. Data tersebut diproses oleh unit pengendali untuk menentukan tindakan yang sesuai terhadap kondisi yang terdeteksi. Pendekatan multisensor memungkinkan kondisi sampah dan lingkungan di dalam tempat sampah dipantau berdasarkan lebih dari satu parameter.

Pada tahap awal, identifikasi sampah dilakukan menggunakan kamera yang ditempatkan pada jalur masuk sampah. Kamera menangkap citra objek sebelum sampah masuk ke dalam wadah. Citra tersebut kemudian diklasifikasikan menggunakan jaringan saraf konvolusional (*Convolutional Neural Network/CNN*) dengan pendekatan *edge computing*. CNN digunakan untuk mengenali karakteristik objek berdasarkan fitur visual seperti bentuk, warna, dan tekstur.

Hasil identifikasi digunakan untuk mengarahkan sampah ke kompartemen yang sesuai, yaitu kompartemen limbah organik, anorganik, dan plastik. Mekanisme aktuasi digunakan untuk mengatur aliran sampah berdasarkan hasil klasifikasi sehingga proses pemilahan dapat berlangsung secara otomatis tanpa intervensi langsung dari pengguna.

Setelah sampah masuk ke dalam wadah, sistem melakukan pemantauan tingkat keterisian menggunakan sensor ultrasonik. Sensor mengukur jarak antara permukaan sampah dan bagian atas wadah untuk memperoleh informasi mengenai tingkat kepenuhan. Mekanisme pemerataan digunakan untuk membantu meratakan timbunan sehingga pemanfaatan ruang penyimpanan menjadi lebih optimal dan hasil pengukuran kapasitas dapat lebih merepresentasikan kondisi di dalam wadah.

Selain pemantauan volume, fokus pengendalian kondisi sampah pada solusi ini diarahkan pada pemantauan dan pengendalian bau. Sistem menggunakan sensor gas untuk mendeteksi perubahan kondisi udara yang berkaitan dengan munculnya bau, serta sensor suhu untuk memantau kondisi lingkungan di dalam tempat sampah. Kedua parameter tersebut digunakan sebagai dasar untuk menentukan tingkat kondisi yang memerlukan tindakan pengendalian.

Data sensor kemudian diproses menggunakan algoritma *Fuzzy Logic*. Melalui *Rule Base*, sistem menentukan respons penyemprotan berdasarkan kondisi gas dan suhu yang terdeteksi. Dengan pendekatan tersebut, durasi penyemprotan dapat disesuaikan dengan tingkat kondisi lingkungan, sehingga sistem tidak hanya bekerja dengan satu durasi tetap. Kondisi gas yang lebih tinggi dan suhu yang lebih tinggi dapat menghasilkan respons penyemprotan yang lebih lama, sedangkan kondisi yang lebih rendah menghasilkan respons yang lebih ringan.

Proses pengendalian bau dilakukan menggunakan pompa yang terhubung dengan *micro-mist nozzle* untuk menghasilkan semprotan dalam bentuk kabut halus. Penggunaan kabut memungkinkan cairan didistribusikan secara lebih merata ke ruang udara di dalam tempat sampah tanpa memberikan cairan secara berlebihan. Setelah proses penyemprotan, sistem memberikan waktu jeda sebelum pembacaan sensor berikutnya untuk mengurangi kemungkinan pengaruh sisa cairan semprot terhadap pembacaan sensor gas.

Secara keseluruhan, solusi ini merupakan Smart Bin terintegrasi yang menggabungkan identifikasi, pemantauan kapasitas, pemerataan sampah, serta pemantauan dan pengendalian bau dalam satu sistem. Dari seluruh fungsi tersebut, mekanisme pemantauan gas, pemantauan suhu, dan pengendalian penyemprotan

berbasis *Fuzzy Logic* menjadi bagian yang secara khusus menangani permasalahan bau akibat kondisi sampah di dalam wadah. Dengan demikian, sistem tidak hanya menangani sampah setelah menumpuk, tetapi juga memberikan respons terhadap perubahan kondisi udara yang berpotensi menimbulkan gangguan bau.

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 merupakan rancang bangun *Smart Bin* berbasis sensor non-visual yang beroperasi secara otomatis untuk melakukan pengolahan awal sampah di lingkungan kampus. Sistem dirancang sebagai satu unit tempat sampah cerdas yang memanfaatkan sensor *proximity* untuk mengendalikan kondisi sampah sejak tahap awal pembuangan. Pendekatan ini ditujukan untuk menangani pencampuran jenis sampah, perubahan volume, penumpukan timbunan, serta munculnya bau akibat pembusukan sampah organik melalui sistem yang relatif sederhana, stabil, dan mudah dalam pemeliharaan.

Pendekatan *proximity* digunakan untuk mengurangi ketergantungan sistem terhadap kondisi pencahayaan, kestabilan visual, dan kebutuhan komputasi yang kompleks. Dengan memanfaatkan karakteristik fisik material sampah, sistem diharapkan mampu beroperasi secara konsisten pada berbagai kondisi lingkungan.

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

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

Berdasarkan hasil estimasi volume tersebut, sistem menentukan kebutuhan perataan timbunan sampah. Perataan dilakukan menggunakan mekanisme mekanik sederhana yang digerakkan oleh motor penggerak. Mekanisme hanya diaktifkan ketika tingkat kepenuhan sampah telah melewati ambang batas tertentu. Perataan tidak dilakukan secara terus-menerus, tetapi hanya untuk menata kembali timbunan agar ruang penampungan dapat dimanfaatkan secara lebih optimal. Pendekatan ini bertujuan meningkatkan kapasitas tampung tanpa memberikan tekanan mekanik berlebih yang berpotensi merusak struktur wadah.

Selain pengendalian volume dan distribusi sampah, sistem ini dilengkapi dengan mekanisme pendeteksian bau sebagai indikator awal pembusukan sampah organik. Pendeteksian 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 melebihi nilai ambang tertentu, kondisi tersebut digunakan sebagai indikasi awal terjadinya pembusukan. Informasi hasil pemantauan kemudian digunakan oleh sistem untuk melakukan tindakan awal, seperti mengaktifkan ventilasi pasif atau memberikan sinyal kondisi penuh, tanpa menggunakan sistem pemantauan lanjutan.

Secara keseluruhan, solusi ini merupakan *Smart Bin* berbasis sensor *proximity* terintegrasi yang berfokus pada pengolahan awal sampah menggunakan sensor fisik. Dengan memanfaatkan sensor material, sensor jarak, dan sensor gas, sistem menawarkan pendekatan yang lebih sederhana dibandingkan solusi berbasis visual,

sehingga dapat digunakan sebagai alternatif 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 merupakan rancang bangun tempat sampah pintar berbasis sensor lingkungan dan logika kondisi otomatis yang dirancang untuk melakukan pengolahan awal sampah secara mandiri dalam satu unit tempat sampah. Sistem dapat beroperasi tanpa interaksi aktif dari pengguna maupun teknologi pengolahan citra yang kompleks. Kemampuan adaptif sistem diperoleh melalui pemantauan perubahan kondisi internal tempat sampah menggunakan sensor lingkungan dan penerapan logika pengambilan keputusan berdasarkan kondisi yang terdeteksi.

Pendekatan ini dirancang untuk menghasilkan sistem dengan kebutuhan komputasi yang relatif sederhana, tetapi tetap mampu mengendalikan kondisi sampah sejak tahap awal pembuangan, termasuk pemisahan dasar, pemantauan volume, penataan timbunan, serta mitigasi awal terhadap potensi bau akibat pembusukan sampah.

Pada tahap awal, identifikasi sampah dilakukan secara pasif menggunakan sensor kelembaban yang ditempatkan pada area masuk sampah. Sensor tersebut mendeteksi karakteristik sampah berdasarkan kadar kelembaban yang terbawa ketika sampah dibuang. Sampah dengan kelembaban tinggi dikategorikan sebagai sampah basah yang cenderung bersifat organik, sedangkan sampah dengan kelembaban rendah dikategorikan sebagai sampah kering yang umumnya bersifat anorganik. Berdasarkan hasil pembacaan sensor, mekanisme pengarah internal memindahkan sampah menuju kompartemen yang sesuai. Dengan demikian, pemisahan dasar sampah organik dan non-organik dapat dilakukan tanpa menggunakan identifikasi visual maupun keterlibatan langsung pengguna.

Setelah sampah masuk ke kompartemen masing-masing, sistem memantau tingkat keterisian menggunakan sensor ketinggian internal secara periodik. Sensor tersebut digunakan untuk mengamati perubahan ketinggian timbunan dan memperkirakan

volume relatif pada setiap kompartemen. Data ketinggian yang diperoleh secara berkelanjutan juga digunakan untuk mengamati pertambahan volume sampah dari waktu ke waktu. Informasi tersebut menjadi dasar bagi sistem dalam menentukan tindakan, seperti penyesuaian mekanisme perataan atau pemberian indikasi ketika kondisi sampah mulai mendekati kapasitas penuh.

Berdasarkan hasil pemantauan volume dan pola pertambahan sampah, sistem mengaktifkan mekanisme perataan secara adaptif. Mekanisme tersebut menggunakan aktuator bermotor untuk menyebarkan timbunan sampah di dalam kompartemen sehingga distribusinya menjadi lebih merata. Aktivasi tidak dilakukan berdasarkan interval waktu yang tetap, tetapi berdasarkan kondisi aktual yang terdeteksi sensor volume, seperti penumpukan pada salah satu sisi atau pertambahan volume yang tidak merata. Pendekatan ini memungkinkan ruang tempat sampah dimanfaatkan secara lebih optimal tanpa melakukan perataan secara berlebihan yang dapat meningkatkan konsumsi energi maupun mempercepat kerusakan mekanik.

Pada aspek pengendalian bau, sistem dilengkapi dengan mekanisme pendeteksian awal kondisi yang berpotensi menimbulkan bau. Pendeteksian dilakukan menggunakan kombinasi sensor suhu dan kelembaban yang ditempatkan di dalam wadah. Peningkatan suhu dan kelembaban digunakan sebagai indikator awal terjadinya proses pembusukan biologis pada sampah organik. Pendekatan ini memanfaatkan hubungan antara proses pembusukan, suhu, dan kelembaban tanpa menggunakan sensor gas khusus. Ketika kondisi tersebut terdeteksi, sistem secara otomatis mengaktifkan kipas ventilasi untuk mempertahankan sirkulasi udara di dalam wadah dan menekan potensi munculnya bau tidak sedap.

Secara keseluruhan, solusi ini merupakan tempat sampah pintar berbasis respons lingkungan yang memanfaatkan sensor sederhana dan logika kondisi otomatis. Pada aspek bau, pendekatan yang digunakan berfokus pada pendeteksian kondisi lingkungan yang menjadi indikator awal pembusukan dan pengaktifan ventilasi sebagai tindakan mitigasi. Dengan pendekatan yang relatif minimalis tersebut, Solusi 3 dapat digunakan sebagai alternatif pembanding terhadap solusi lain yang menerapkan teknologi lebih kompleks. Kecerdasan sistem terutama terletak pada

kemampuannya menyesuaikan respons berdasarkan kondisi internal tempat sampah, bukan pada kompleksitas 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 dengan aspek *low cost* karena sistem memerlukan beberapa sensor untuk memperoleh informasi mengenai kondisi sampah dan lingkungan, termasuk sensor gas untuk mendeteksi perubahan kondisi udara. Penggunaan sensor tersebut menambah biaya perangkat keras, tetapi masih dapat dikendalikan karena tidak memerlukan sensor industri dengan tingkat presisi tinggi. Dengan demikian, kebutuhan sensor untuk pemantauan kondisi bau masih berada dalam batas biaya yang dapat diterima untuk penerapan pada lingkungan kampus.

- Waste Classification Capability (Hubungan Biasa)

Waste classification capability memiliki hubungan biasa dengan aspek *low cost* karena proses identifikasi sampah membutuhkan perangkat pendukung seperti kamera dan unit pemrosesan. Meskipun kebutuhan tersebut menambah biaya implementasi, pendekatan yang digunakan tidak memerlukan infrastruktur komputasi berskala besar. Oleh karena itu, pengaruh kemampuan klasifikasi terhadap biaya keseluruhan masih berada pada tingkat yang dapat diterima.

- Computation Capability (Hubungan Kurang)

Computation capability memiliki hubungan yang lemah dengan aspek *low cost* karena sistem dapat menggunakan perangkat komputasi kelas *embedded* tanpa memerlukan akselerator khusus. Kebutuhan komputasi untuk mengolah data sensor, termasuk data yang digunakan dalam pemantauan kondisi bau, tidak menjadi faktor utama dalam peningkatan biaya sistem.

- Odor Detection and Control Capability (Hubungan Biasa)

Odor detection and control capability memiliki hubungan biasa dengan aspek *low cost* karena membutuhkan sensor gas dan komponen pengendalian tambahan seperti aktuator. Meskipun komponen tersebut meningkatkan biaya perangkat keras, penggunaan sensor dan aktuator yang umum serta mudah diperoleh dapat menjaga biaya tetap terkendali. Penambahan komponen tersebut sebanding dengan fungsi pengendalian bau yang diberikan kepada sistem.

2. All-in-One Design

- Sensing Capability (Hubungan Biasa)

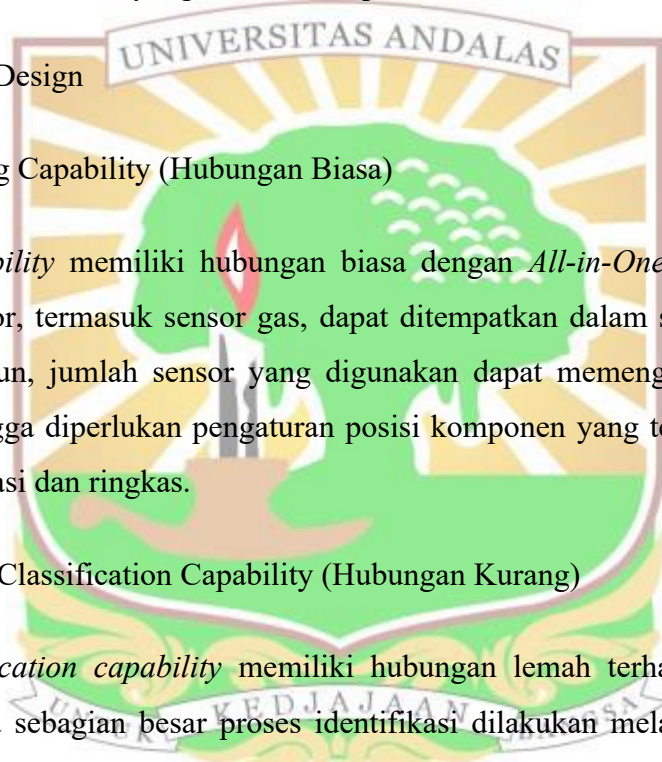
Sensing capability memiliki hubungan biasa dengan *All-in-One Design* karena berbagai sensor, termasuk sensor gas, dapat ditempatkan dalam satu unit tempat sampah. Namun, jumlah sensor yang digunakan dapat memengaruhi tata letak internal sehingga diperlukan pengaturan posisi komponen yang tepat agar sistem tetap terintegrasi dan ringkas.

- Waste Classification Capability (Hubungan Kurang)

Waste classification capability memiliki hubungan lemah terhadap *All-in-One Design* karena sebagian besar proses identifikasi dilakukan melalui pemrosesan data dan tidak secara langsung menentukan ukuran fisik utama sistem. Kebutuhan komponen pendukung tetap ada, tetapi pengaruhnya terhadap integrasi keseluruhan relatif kecil.

- Computation Capability (Hubungan Biasa)

Computation capability memiliki hubungan biasa dengan *All-in-One Design* karena perangkat komputasi yang digunakan turut memengaruhi kebutuhan ruang di dalam sistem. Pemilihan unit komputasi yang sesuai memungkinkan proses pengolahan data sensor dan pengendalian sistem tetap terintegrasi dalam satu tempat sampah.



- 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 dan komponen pengendalian bau dapat ditempatkan pada bagian tertentu di dalam sistem tanpa secara langsung memengaruhi dimensi utama tempat sampah.

3. Hygiene and Safety Oriented

- Sensing Capability (Hubungan Kuat)

Sensing capability memiliki hubungan kuat terhadap aspek *hygiene and safety* karena sensor digunakan untuk memperoleh informasi mengenai kondisi sampah dan lingkungan di dalam wadah. Kemampuan mendeteksi perubahan kondisi tersebut menjadi dasar untuk mengetahui potensi pembusukan dan munculnya bau yang dapat mengurangi kenyamanan lingkungan.

- Waste Classification Capability (Hubungan Kuat)

Waste classification capability memiliki hubungan kuat dengan *hygiene and safety* karena pemilahan sejak tahap awal dapat mengurangi pencampuran sampah basah dengan sampah kering. Kondisi tersebut membantu mengurangi kontaminasi dan faktor yang dapat memperburuk kondisi sampah serta memicu munculnya bau.

- Computation Capability (Tidak Ada Hubungan)

Computation capability tidak memiliki hubungan langsung dengan aspek *hygiene and safety* karena fungsi utamanya adalah mengolah data sensor dan menentukan keputusan sistem. Kemampuan komputasi tidak secara langsung mengubah kondisi fisik sampah maupun kondisi kebersihan tempat sampah.

- Odor Detection and Control Capability (Hubungan Kuat)

Odor detection and control capability memiliki hubungan kuat dengan aspek *hygiene and safety* karena secara langsung menangani kondisi bau yang berasal dari proses pembusukan sampah. Kemampuan mendeteksi perubahan kondisi gas dan memberikan respons pengendalian membantu menjaga kenyamanan serta kondisi lingkungan di sekitar tempat sampah.

4. Durability

- Sensing Capability (Hubungan Biasa)

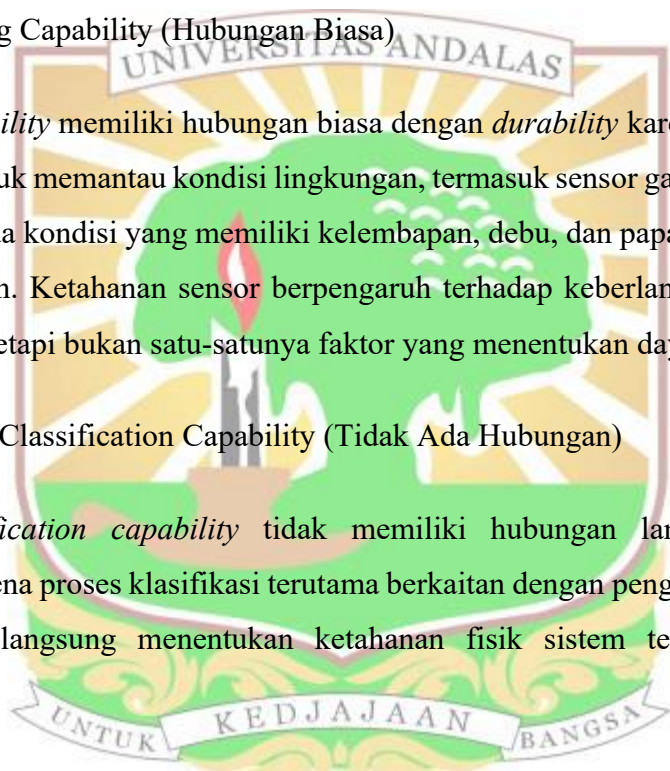
Sensing capability memiliki hubungan biasa dengan *durability* karena sensor yang digunakan untuk memantau kondisi lingkungan, termasuk sensor gas, harus mampu beroperasi pada kondisi yang memiliki kelembapan, debu, dan paparan lingkungan tempat sampah. Ketahanan sensor berpengaruh terhadap keberlangsungan fungsi pemantauan, tetapi bukan satu-satunya faktor yang menentukan daya tahan sistem.

- Waste Classification Capability (Tidak Ada Hubungan)

Waste classification capability tidak memiliki hubungan langsung dengan *durability* karena proses klasifikasi terutama berkaitan dengan pengolahan data dan tidak secara langsung menentukan ketahanan fisik sistem terhadap kondisi lingkungan.

- Computation Capability (Hubungan Kurang)

Computation capability memiliki hubungan lemah dengan *durability* karena unit komputasi dapat beroperasi dalam jangka panjang selama kondisi pengoperasian, terutama suhu dan kelistrikan, tetap berada dalam batas yang sesuai. Pengolahan data sensor untuk kebutuhan pemantauan bau tidak secara langsung menentukan ketahanan fisik sistem.



- Odor Detection and Control Capability (Hubungan Biasa)

Odor detection and control capability memiliki hubungan biasa dengan *durability* karena sensor gas dan komponen pengendalian bau digunakan secara berulang selama sistem beroperasi. Penggunaan dalam jangka panjang dapat memengaruhi umur pakai sensor dan aktuator sehingga diperlukan perhatian terhadap pemeliharaan serta kemungkinan penggantian komponen secara berkala.

5. Completed in Less Than 6 Months

- Sensing Capability (Tidak Ada Hubungan)

Sensing capability tidak memiliki hubungan langsung dengan waktu penyelesaian proyek karena sensor yang digunakan umumnya tersedia di pasaran dan dapat diperoleh tanpa proses pengembangan khusus.

- Waste Classification Capability (Hubungan Biasa)

Waste classification capability memiliki hubungan biasa dengan waktu penyelesaian proyek karena penerapan dan pengujian metode klasifikasi membutuhkan proses penyesuaian dan beberapa kali iterasi, tetapi tidak memerlukan pengembangan algoritma yang kompleks dalam jangka panjang.

- Computation Capability (Hubungan Kurang)

Computation capability memiliki hubungan yang lemah dengan waktu penyelesaian proyek karena sistem menggunakan proses komputasi yang relatif ringan dan tidak membutuhkan tahapan pelatihan maupun optimasi yang memerlukan waktu panjang.

- Odor Detection and Control Capability (Tidak Ada Hubungan)

Odor detection and control capability tidak memiliki hubungan yang signifikan terhadap waktu penyelesaian proyek karena sensor gas dapat diperoleh dan diintegrasikan secara langsung 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 memanfaatkan kombinasi kamera, sensor jarak, dan sensor gas untuk memperoleh informasi mengenai kondisi sampah secara menyeluruh.

- Waste Classification Capability (Hubungan Kuat)

Solusi 1 memiliki hubungan kuat dengan *waste classification capability* karena proses identifikasi sampah dilakukan sejak tahap awal pembuangan dengan memanfaatkan informasi visual dan logika berbasis aturan.

- Computation Capability (Hubungan Biasa)

Solusi 1 memiliki hubungan biasa dengan *computation capability* karena sistem memerlukan pengolahan data dari sensor dan citra, tetapi tidak menggunakan algoritma komputasi yang terlalu kompleks.

- Odor Detection and Control Capability (Hubungan Kuat)

Solusi 1 memiliki hubungan kuat dengan *odor detection and control capability* karena pemantauan kondisi bau dilakukan secara langsung menggunakan sensor gas sebagai salah satu indikator terjadinya pembusukan.

7. Solusi 2 *Smart Bin Sensor Non-Visual*

- Sensing Capability (Hubungan Kuat)

Solusi 2 memiliki hubungan kuat dengan *sensing capability* karena keseluruhan proses sistem bergantung pada penggunaan sensor fisik non-visual untuk memperoleh informasi mengenai kondisi sampah.

- Waste Classification Capability (Hubungan Biasa)

Solusi 2 memiliki hubungan biasa dengan *waste classification capability* karena proses klasifikasi dilakukan berdasarkan karakteristik fisik material yang diperoleh dari hasil pembacaan sensor.

- Computation Capability (Hubungan Biasa)

Solusi 2 memiliki hubungan biasa dengan *computation capability* karena data sensor diolah menggunakan logika ambang batas dan kombinasi hasil pembacaan beberapa sensor yang relatif sederhana.

- Odor Detection and Control Capability (Hubungan Kuat)

Solusi 2 memiliki hubungan kuat dengan *odor detection and control capability* karena pendeteksian bau dilakukan secara langsung menggunakan sensor gas sebagai dasar pemantauan kondisi udara.

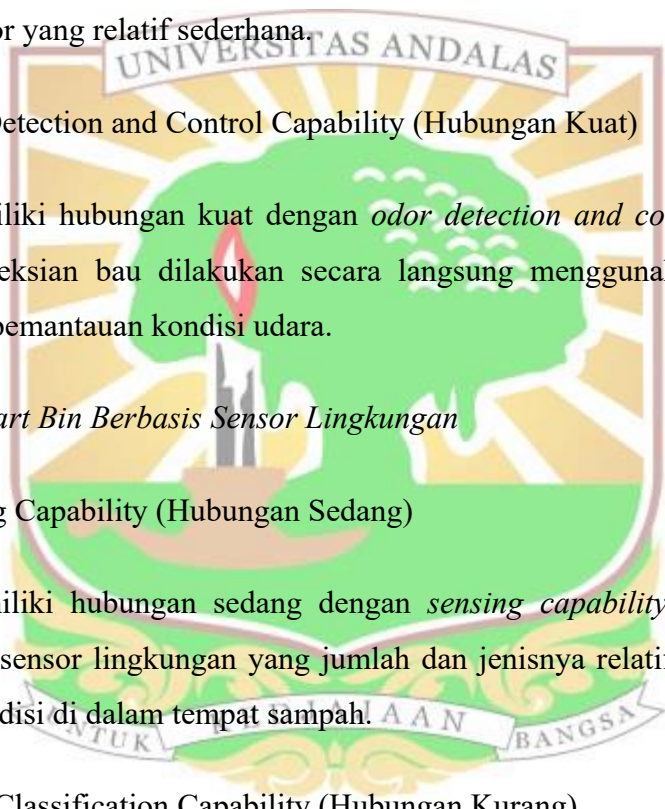
8. Solusi 3 *Smart Bin Berbasis Sensor Lingkungan*

- Sensing Capability (Hubungan Sedang)

Solusi 3 memiliki hubungan sedang dengan *sensing capability* karena sistem menggunakan sensor lingkungan yang jumlah dan jenisnya relatif terbatas untuk memantau kondisi di dalam tempat sampah.

- Waste Classification Capability (Hubungan Kurang)

Solusi 3 memiliki hubungan lemah dengan *waste classification capability* karena proses identifikasi hanya dilakukan berdasarkan indikator lingkungan, seperti tingkat kelembaban, sehingga kemampuan klasifikasinya lebih terbatas.



- Computation Capability (Hubungan Kurang)

Solusi 3 memiliki hubungan lemah dengan *computation capability* karena sistem menggunakan logika pengambilan keputusan yang relatif sederhana berdasarkan kondisi sensor.

- Odor Detection and Control Capability (Hubungan Sedang)

Solusi 3 memiliki hubungan sedang dengan *odor detection and control capability* karena kondisi bau tidak dideteksi secara langsung melalui sensor gas, tetapi diperkirakan berdasarkan perubahan parameter lingkungan seperti suhu dan kelembaban.

1.2.4 Solusi yang dipilih

Berdasarkan hasil analisis *House of Quality* (HoQ), pemilihan solusi dilakukan dengan mempertimbangkan tingkat pemenuhan terhadap fitur dasar dan fitur tambahan yang menjadi kebutuhan sistem pengelolaan sampah di lingkungan kampus. Penilaian tidak hanya memperhatikan aspek teknis, tetapi juga kesesuaian solusi terhadap permasalahan pengelolaan sampah sejak tahap awal pembuangan, terutama dalam menangani kondisi yang dapat memicu munculnya bau.

Hasil analisis HoQ menunjukkan bahwa Solusi 1 (*Smart Bin Multi-Sensor Terintegrasi*) memiliki tingkat pemenuhan tertinggi dan paling seimbang dibandingkan dengan dua solusi lainnya. Solusi ini memiliki hubungan kuat dengan beberapa fitur utama, khususnya *sensing capability*, *waste classification capability*, serta *odor detection and control capability*. Ketiga kemampuan tersebut mendukung pemantauan kondisi sampah dan lingkungan di dalam tempat sampah, termasuk kondisi yang berkaitan dengan pembusukan dan munculnya bau.

Keunggulan utama Solusi 1 terletak pada penggunaan pendekatan multisensor yang menggabungkan sensor visual, sensor jarak, dan sensor gas. Kombinasi tersebut memungkinkan sistem memperoleh informasi mengenai kondisi sampah dan lingkungan secara lebih menyeluruh. Khusus pada aspek bau, penggunaan sensor

gas memungkinkan perubahan kondisi udara di dalam tempat sampah dipantau secara langsung sebagai salah satu indikator terjadinya pembusukan.

Pada aspek pengendalian bau, Solusi 1 memiliki keunggulan karena tidak hanya mengandalkan pengamatan terhadap kondisi fisik sampah, tetapi juga memanfaatkan data sensor gas sebagai dasar untuk mendeteksi perubahan kondisi udara. Informasi tersebut dapat digunakan dalam proses pengambilan keputusan sistem sehingga respons terhadap kondisi bau dapat dilakukan secara otomatis. Dengan demikian, kemampuan tersebut mendukung upaya pengendalian bau sebelum kondisi pembusukan berkembang lebih lanjut dan mengganggu kenyamanan lingkungan kampus.

Meskipun Solusi 1 bukan merupakan solusi yang paling unggul pada seluruh fitur tambahan, seperti biaya maupun kesederhanaan desain, tingkat pemenuhannya masih berada pada kategori yang realistis untuk diterapkan di lingkungan kampus. Solusi 2 memiliki keterbatasan pada kemampuan klasifikasi, sedangkan Solusi 3 memiliki kemampuan pemantauan bau yang bersifat tidak langsung karena menggunakan parameter lingkungan sebagai indikator. Oleh karena itu, Solusi 1 dipilih sebagai solusi utama karena memiliki kesesuaian paling baik dengan kebutuhan sistem secara keseluruhan, terutama dalam menyediakan kemampuan pemantauan kondisi gas dan pengendalian bau secara lebih langsung sebagai bagian dari pengolahan awal sampah.

