

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan Masalah

Sebagai negara dengan jumlah petani yang besar dan keragaman komoditas pertanian yang tinggi, sektor pertanian di Indonesia memiliki peran strategis dalam menjaga ketersediaan pangan dan keberlanjutan ekonomi masyarakat. Namun, besarnya potensi produksi tersebut belum sepenuhnya diiringi dengan kemampuan menjaga mutu hasil pertanian sepanjang rantai pasok. *Food and Agriculture Organization (FAO)* melaporkan bahwa sekitar 14% pangan global hilang sebelum mencapai tahap ritel, dengan proporsi terbesar terjadi pada negara berkembang dan pada komoditas segar yang sensitif terhadap perlakuan panen dan pascapanen [1]. Kondisi ini menunjukkan bahwa permasalahan utama tidak hanya terletak pada kapasitas produksi, tetapi juga pada pengendalian mutu produk hingga sampai ke konsumen.

Food loss didefinisikan sebagai penurunan jumlah pangan yang dapat dikonsumsi manusia di sepanjang tahapan rantai pasok. Selain penurunan kuantitas, *food loss* juga mencakup penurunan kualitas yang berdampak pada nilai gizi, nilai ekonomi, dan keamanan pangan. Khan et al. menegaskan bahwa pada negara berkembang, sebagian besar *food loss* terjadi akibat lemahnya pengendalian mutu pada tahap pascapanen dan distribusi [1]. Secara global, nilai ekonomi pangan yang hilang atau terbuang diperkirakan mencapai US\$1 triliun per tahun, sehingga *food loss* menjadi permasalahan ekonomi dan keberlanjutan yang krusial [2]. Oleh karena itu, pengurangan *food loss* ditetapkan sebagai salah satu target utama dalam agenda *Sustainable Development Goals (SDGs)* poin ke-12, yaitu menjamin pola konsumsi dan produksi yang berkelanjutan [3].

Di tingkat nasional, permasalahan *food loss* juga menunjukkan dampak yang signifikan. Berdasarkan kajian Badan Perencanaan Pembangunan Nasional (Bappenas), limbah dan susut pangan (*food loss and waste*) di Indonesia diperkirakan mencapai 23–48 juta ton per tahun, atau setara dengan 115–184 kg per

kapita per tahun. Jumlah tersebut secara teoritis dapat memenuhi kebutuhan pangan 61–125 juta penduduk, atau sekitar 29–47% populasi Indonesia. Selain dampak sosial, kerugian ekonomi yang ditimbulkan diperkirakan mencapai Rp213–551 triliun per tahun, setara dengan 4–5% Produk Domestik Bruto (PDB) Indonesia[4]. Data ini menunjukkan bahwa *food loss* merupakan permasalahan serius yang berdampak langsung pada ketahanan pangan dan perekonomian nasional.

Salah satu subsektor pangan yang paling terdampak oleh *food loss* adalah hortikultura, khususnya komoditas segar seperti sayuran dan buah-buahan. Kajian Bappenas menunjukkan bahwa subsektor hortikultura mengalami tingkat *food loss and waste* tertinggi dibandingkan subsektor pangan lainnya, yaitu sebesar 31,8%. Di antara komoditas hortikultura tersebut, sayuran mengalami tingkat *food loss* paling tinggi, mencapai 62,8%, sedangkan buah-buahan berada pada kisaran 45,5%, dengan kehilangan nilai ekonomi masing-masing lebih dari Rp20 triliun per tahun. Tingginya angka tersebut menunjukkan bahwa penurunan mutu pascapanen dan distribusi merupakan titik kritis dalam rantai pasok hortikultura[4].

Cabai merupakan salah satu komoditas hortikultura strategis di Indonesia dengan tingkat konsumsi tinggi dan pengaruh signifikan terhadap stabilitas harga pangan. Namun, cabai juga termasuk komoditas dengan tingkat *food loss* yang relatif tinggi. Kajian nasional menunjukkan bahwa tingkat *food loss* pada cabai berada pada rentang 13,3–38,7%, bergantung pada panjang rantai distribusi dan metode penanganan pascapanen[4]. Al-Dairi et al. melaporkan bahwa tahap distribusi, termasuk pengemasan dan transportasi, berkontribusi sekitar 9–10% dari total *food loss* cabai[5]. Tingginya kerugian ini diperparah oleh sifat fisiologis cabai sebagai produk hortikultura segar yang masih mengalami proses respirasi dan penuaan (*senescence*) setelah panen, sehingga sangat rentan mengalami penurunan mutu apabila kondisi suhu dan kelembaban selama distribusi tidak terkendali.

Sebagai mahasiswa Teknik Komputer, tim penulis memiliki ketertarikan terhadap penerapan teknologi komputasi untuk menjawab permasalahan penurunan mutu dan *food loss* pada sektor pertanian. Pada komoditas cabai, penurunan mutu

umumnya terjadi secara bertahap dan dipengaruhi oleh faktor teknis yang sebenarnya dapat diukur dan dipantau. Namun, keterbatasan sistem pemantauan yang terukur dan *real-time* menyebabkan perubahan mutu tersebut tidak terdeteksi sejak tahap awal, sehingga tindakan penanganan sering kali terlambat dilakukan.

Permasalahan ini mempengaruhi berbagai *stakeholder* dalam rantai pasok pertanian. Petani terdampak langsung oleh penyusutan nilai hasil panen. Di sisi lain, pelaku distribusi menanggung risiko kerusakan selama pengangkutan, dan pembeli hilir menerima dampak berupa ketidakkonsistenan kualitas dan pasokan produk. Dengan demikian, kehilangan mutu bukan hanya persoalan teknis pada satu tahap, melainkan persoalan bersama yang memerlukan solusi terintegrasi lintas tahapan dan lintas pelaku [6]. Oleh karena itu, penelitian ini dimotivasi oleh kebutuhan akan solusi berbasis teknologi yang mampu melakukan pemantauan dan pengendalian mutu secara lebih akurat, efisien, dan berkelanjutan pada titik-titik kritis rantai pasok, sehingga dapat memberikan manfaat bagi seluruh *stakeholder* dan mendukung keberlanjutan sektor pertanian.

1.1.1 Informasi Pendukung Masalah

Cabai (*Capsicum annuum L.*) merupakan komoditas hortikultura segar yang masih mengalami aktivitas fisiologis setelah panen, seperti respirasi dan transpirasi, sehingga sangat rentan mengalami penurunan mutu selama tahap pascapanen dan distribusi. Cabai dikategorikan dalam kondisi segar apabila masih mempertahankan karakteristik awalnya, antara lain tekstur jaringan yang keras dan seragam, warna alami, kadar air yang stabil, serta tidak menunjukkan gejala pelayuan, pelunakan, atau perubahan warna yang signifikan. Sebaliknya, penurunan kesegaran pada cabai ditandai dengan meningkatnya susut bobot, pelunakan jaringan, perubahan warna, serta munculnya gejala awal pembusukan yang secara langsung menurunkan mutu dan nilai jual produk.[7]

Penurunan mutu cabai pascapanen tidak hanya disebabkan oleh aktivitas fisiologis internal, tetapi juga dipengaruhi oleh berbagai bentuk kerusakan yang terjadi selama proses penanganan dan distribusi. Kerusakan pascapanen pada cabai

merupakan hasil interaksi antara proses fisiologis alami setelah panen dan perlakuan eksternal yang diterima selama panen, sortasi, pengemasan, dan transportasi[7]. Berdasarkan mekanisme terjadinya, kerusakan pascapanen pada cabai dapat dikelompokkan menjadi kerusakan fisiologis, kerusakan mekanis, dan kerusakan fisik, yang saling berinteraksi dan mempercepat penurunan mutu produk.

Kerusakan fisiologis berkaitan dengan proses metabolisme alami cabai setelah panen, seperti respirasi, transpirasi, dan pematangan, yang menyebabkan konsumsi cadangan energi, kehilangan air, serta perubahan struktur jaringan[8]. Laju kerusakan fisiologis ini sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, terutama suhu dan kelembaban relatif, sehingga tanpa pengendalian yang memadai produk akan lebih cepat mengalami pelayuan, pelunakan, dan penurunan kualitas sensor.[9]

Lalu kerusakan mekanis sendiri terjadi akibat benturan, tekanan, gesekan, atau getaran yang dialami cabai selama proses panen, sortasi, pengemasan, dan transportasi. Kerusakan ini dapat berupa memar atau luka pada jaringan produk yang sering kali tidak langsung terlihat secara visual, namun meningkatkan laju respirasi lokal dan membuka jalur masuk bagi mikroorganisme sehingga mempercepat proses pembusukan selama tahap pascapanen dan distribusi [10], [11]

Terakhir ada kerusakan fisik yang berkaitan dengan pengaruh lingkungan eksternal yang tidak sesuai, seperti paparan suhu ekstrim, kelembaban yang tidak terkendali, paparan cahaya berlebih, serta akumulasi gas hasil respirasi di ruang penyimpanan. Kondisi tersebut dapat menciptakan iklim mikro yang tidak ideal dan mempercepat degradasi mutu cabai selama tahap penyimpanan dan distribusi [8]

Ketiga jenis kerusakan tersebut saling berinteraksi dan mempercepat penurunan mutu cabai selama tahap pascapanen dan distribusi. Oleh karena itu, pengelolaan kondisi lingkungan menjadi aspek penting dalam upaya menekan dampak kerusakan fisiologis, mekanis, dan fisik secara simultan.

Pada tahap distribusi, kualitas cabai segar sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan penyimpanan dan transportasi. Laju perubahan dari kondisi segar menuju rusak sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan pascapanen. Penelitian menunjukkan bahwa variabel lingkungan berperan dominan dalam menentukan kecepatan degradasi mutu, khususnya pada produk yang masih aktif secara fisiologis. Faktor-faktor utama yang mempengaruhi kondisi ideal pascapanen meliputi:

1. Suhu

Suhu merupakan faktor utama yang mempengaruhi laju respirasi dan degradasi mutu produk pertanian segar seperti cabai selama tahap pascapanen. Peningkatan suhu menyebabkan percepatan aktivitas fisiologis dan pertumbuhan mikroorganisme, sehingga produk lebih cepat mengalami pelayuan dan pembusukan [8]. Secara umum, kajian fisiologi pascapanen melaporkan bahwa rentang suhu penyimpanan yang masih aman bagi produk pertanian segar berada pada kisaran 0–15 °C, dengan nilai optimum yang berbeda tergantung pada jenis komoditas [8].

Suhu penyimpanan di atas 20 °C dilaporkan meningkatkan laju respirasi hingga 2–3 kali lipat dibandingkan kondisi suhu rendah, yang berdampak pada percepatan penurunan mutu dan pemendekan umur simpan produk.[10] Sebaliknya, penyimpanan pada suhu yang terlalu rendah, khususnya di bawah 5 °C untuk komoditas tertentu, berpotensi menyebabkan kerusakan fisiologis (*chilling injury*) yang ditandai dengan munculnya bercak permukaan, perubahan tekstur, serta penurunan kualitas sensori produk [10]. Oleh karena itu, sebagian besar produk pertanian segar memerlukan pengelolaan suhu penyimpanan yang berada dalam rentang 0–15 °C agar laju respirasi dapat ditekan tanpa menimbulkan kerusakan akibat suhu rendah.

2. Kelembaban

Kelembaban relatif juga berperan penting dalam mempertahankan kesegaran produk. Kelembaban di bawah 85 % menyebabkan kehilangan air yang cepat dan memicu susut bobot hingga 5–10 % dalam beberapa hari penyimpanan, yang secara visual terlihat sebagai pelayuan. Sebaliknya, kelembaban relatif yang terlalu tinggi (di atas 95 %) meningkatkan risiko kondensasi dan pertumbuhan mikroorganisme yang mempercepat pembusukan jaringan. Oleh karena itu, sebagian besar produk pertanian segar memerlukan rentang kelembaban relatif optimal antara 85–95 % untuk menjaga keseimbangan antara kehilangan air dan risiko mikrobiologis[10]

3. Konsentrasi Gas

Produk pertanian segar yang telah dipanen masih mengalami aktivitas fisiologis berupa respirasi dan metabolisme yang menghasilkan berbagai gas dan senyawa volatil di lingkungan penyimpanan. Senyawa volatil yaitu kelompok senyawa organik yang mudah menguap pada suhu ruang dan dilepaskan ke udara sebagai hasil dari aktivitas fisiologis dan metabolisme produk pertanian segar. Senyawa ini terbentuk secara alami selama proses respirasi, pematangan, serta sebagai respons terhadap stres lingkungan dan kerusakan jaringan pada tahap pascapanen[12]. Gas dan senyawa volatil tersebut dilepaskan sebagai hasil dari proses fisiologis normal maupun sebagai respons terhadap stres lingkungan dan awal kerusakan jaringan. Perubahan komposisi dan konsentrasi gas di sekitar produk telah banyak dilaporkan berkorelasi dengan percepatan penurunan mutu pascapanen[12]

Salah satu gas fisiologis yang memiliki peran penting dalam proses pascapanen adalah etilena (C_2H_4). Etilena merupakan hormon tanaman berbentuk gas yang secara alami dihasilkan oleh produk pertanian segar, khususnya pada komoditas klimaterik, dan berperan dalam mengatur proses pematangan, penuaan, serta pelunakan jaringan. Penelitian menunjukkan

bahwa konsentrasi etilena yang sangat rendah, pada kisaran 0,1–1 ppm, sudah cukup untuk memicu percepatan pematangan dan penurunan mutu produk, sementara konsentrasi di atas 1 ppm dapat mempercepat penuaan dan pembusukan secara signifikan[12]. Akumulasi etilena dalam ruang penyimpanan sering terjadi akibat sirkulasi udara yang tidak memadai, sehingga mempercepat degradasi mutu secara tidak merata dalam satu batch produk [13].

Selain etilena, proses respirasi produk pertanian segar juga menghasilkan karbon dioksida (CO_2) serta berbagai senyawa organik volatil (*Volatile Organic Compounds/VOCs*) seperti aldehida, alkohol, ester, dan keton. Peningkatan konsentrasi CO_2 mencerminkan meningkatnya laju respirasi, sedangkan peningkatan total senyawa volatil (TVOC) sering dikaitkan dengan stres fisiologis, kerusakan jaringan, dan tahap awal pembusukan produk. Sejumlah studi melaporkan bahwa perubahan nilai TVOC dan CO_2 dapat terdeteksi lebih awal dibandingkan gejala visual kerusakan, sehingga parameter ini banyak digunakan sebagai indikator tidak langsung (*proxy*) kondisi fisiologis dan penurunan mutu pascapanen[12].

4. Paparan Cahaya

Paparan cahaya merupakan faktor lingkungan yang dapat memengaruhi mutu produk pertanian segar selama tahap pascapanen. Intensitas cahaya yang tidak terkendali dilaporkan mempercepat perubahan warna, degradasi pigmen alami, serta peningkatan suhu lokal pada permukaan produk, yang secara tidak langsung meningkatkan laju respirasi dan kehilangan air. Selain itu, distribusi cahaya yang tidak merata dapat membentuk mikroklimat lokal, sehingga penurunan mutu terjadi secara tidak seragam dalam satu batch produk[13]

Faktor-faktor lingkungan tersebut menunjukkan bahwa pengendalian mutu pascapanen memerlukan pemantauan kondisi lingkungan yang bersifat kontinu dan terintegrasi. Tanpa pemantauan yang memadai, perubahan kecil pada suhu,

kelembaban, konsentrasi gas, dan paparan cahaya berpotensi mempercepat penurunan mutu produk pertanian segar selama distribusi.

Selain faktor lingkungan, metode penyimpanan dan pengemasan yang digunakan di lapangan turut memengaruhi tingkat kerusakan cabai selama distribusi. Berdasarkan hasil wawancara dengan pelaku distribusi, cabai umumnya disimpan dan diangkut menggunakan karung karena kapasitasnya besar dan mudah digunakan. Namun, metode ini dilaporkan menyebabkan tekanan dan gesekan antar cabai yang tinggi, sehingga kerusakan mekanis seperti patah dan luka dapat mencapai sekitar 15 kg dari total 50 kg cabai dalam satu kali pengiriman. Kerusakan tersebut mempercepat penurunan mutu selama penyimpanan lanjutan.

Sebagai alternatif, sebagian pelaku distribusi menggunakan kantong plastik untuk mengurangi tekanan dan gesekan antar cabai. Penggunaan kantong plastik dilaporkan mampu menekan kerusakan mekanis, namun memiliki keterbatasan kapasitas tampung dan berpotensi menyebabkan akumulasi uap air serta gas respirasi apabila ventilasi tidak memadai. Kondisi ini menunjukkan adanya keterbatasan pada metode penyimpanan yang digunakan saat ini dalam menjaga keseimbangan antara perlindungan mekanis, kapasitas distribusi, dan pengendalian lingkungan.

Berdasarkan keseluruhan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa penurunan mutu cabai pascapanen merupakan permasalahan kompleks yang dipengaruhi oleh interaksi antara kerusakan fisiologis, mekanis, dan fisik, serta sangat bergantung pada kondisi lingkungan dan metode penyimpanan selama distribusi. Rentang kondisi ideal yang sempit serta praktik penanganan yang belum optimal menjadikan tahap pascapanen sebagai fase kritis dalam menjaga mutu cabai dan menekan kerugian pascapanen.

1.2 Analisis Masalah dan Konstrain

1. Aspek Keberlanjutan (Konstrain: keterbatasan lahan)

Dalam konteks sektor pertanian, keberlanjutan tidak hanya berkaitan dengan produktivitas hasil panen, tetapi juga dengan pemanfaatan sumber daya yang tersedia secara efisien. Salah satu keterbatasan utama dalam pengembangan kegiatan pertanian adalah keterbatasan lahan pembudidayaan. Lahan pertanian yang tersedia sering kali terbatas dan harus dimanfaatkan secara optimal agar tetap mampu menghasilkan produk dengan kualitas yang baik.

Keterbatasan lahan ini menjadi faktor penting yang mempengaruhi keberlanjutan program karena ruang untuk ekspansi produksi tidak selalu tersedia. Oleh karena itu, solusi teknologi yang dikembangkan perlu mampu meningkatkan efisiensi pemanenan dan penanganan pascapanen tanpa memerlukan perluasan lahan. Sistem yang dirancang diharapkan mampu membantu meningkatkan kualitas hasil panen dan menekan kehilangan produk sehingga produktivitas lahan yang terbatas dapat dimanfaatkan secara lebih optimal.

Selain itu, sistem ini difokuskan untuk penanganan cabai yang baru dipanen dan segera memasuki tahap penyimpanan pascapanen. Pembatasan ini diterapkan karena cabai yang telah disimpan dalam waktu lama umumnya mengalami peningkatan aktivitas respirasi dan pembentukan gas volatil yang lebih tinggi akibat proses pematangan maupun pembusukan. Kondisi tersebut dapat mempengaruhi karakteristik lingkungan penyimpanan dan hasil pemantauan kualitas udara yang dilakukan oleh sistem. Dengan demikian, penerapan sistem pada cabai yang baru dipanen diharapkan dapat memberikan hasil pengendalian dan pemantauan yang lebih optimal dalam mempertahankan mutu produk selama masa penyimpanan.

2. Aspek Ekonomi (Konstrain: Keterbatasan Pendanaan)

Sektor pertanian, khususnya pada skala kecil hingga menengah, sering menghadapi keterbatasan pendanaan baik dalam investasi awal maupun biaya operasional. Penggunaan teknologi dengan biaya tinggi dapat menjadi hambatan bagi petani atau pelaku distribusi dalam mengadopsi sistem baru di lapangan.

Oleh karena itu, sistem yang dikembangkan harus mempertimbangkan keterbatasan dana sebagai salah satu konstrain utama. Seluruh proses pengembangan sistem, termasuk perancangan perangkat keras, perangkat lunak, serta pengujian sistem, dirancang agar tetap berada dalam batas anggaran maksimal sebesar Rp6.000.000. Selain itu, komponen yang digunakan harus mudah diperoleh di pasar lokal, tidak bergantung pada vendor tertentu, serta mudah diganti untuk menekan biaya pemeliharaan di masa depan.

3. Aspek Pendidikan (Konstrain: Tingkat Pendidikan)

Dalam implementasi teknologi pada sektor pertanian, faktor sosial juga menjadi pertimbangan penting. Pengguna sistem di lapangan, seperti petani, operator mesin, maupun pelaku distribusi, dapat memiliki latar belakang pendidikan yang beragam. Kegiatan pemanenan maupun distribusi pada umumnya tidak mensyaratkan tingkat pendidikan tertentu, sehingga kemampuan pemahaman teknis antar pengguna dapat berbeda-beda.

Variasi latar belakang pendidikan ini dapat mempengaruhi tingkat pemahaman terhadap teknologi yang digunakan. Oleh karena itu, sistem yang dirancang harus memiliki antarmuka yang sederhana, mudah dipahami, serta tidak memerlukan pelatihan teknis yang kompleks. Dengan pendekatan ini, sistem diharapkan dapat digunakan oleh berbagai pengguna tanpa bergantung pada kemampuan teknis yang tinggi.

4. Aspek Lingkungan (Konstrain: Pembuangan Limbah)

Selain aspek teknis dan operasional, pengembangan sistem juga perlu mempertimbangkan dampaknya terhadap lingkungan. Pada kegiatan pertanian, khususnya pada tahap panen dan pascapanen, sering dihasilkan limbah berupa produk yang rusak atau tidak memenuhi standar kualitas.

Oleh karena itu, salah satu konstrain lingkungan dalam penelitian ini adalah komitmen untuk tidak menghasilkan limbah pemrosesan yang berlebihan, khususnya pada tahap panen dan pascapanen. Sistem yang dikembangkan harus mampu membantu menjaga kualitas hasil panen sehingga jumlah produk yang rusak dapat diminimalkan. Dengan demikian, penerapan sistem tidak hanya meningkatkan efisiensi proses tetapi juga mendukung pengelolaan lingkungan yang lebih berkelanjutan.

5. Aspek Keselamatan Kerja (Konstrain: Mortalitas)

Integrasi teknologi pada proses pemanenan dan pascapanen juga harus mempertimbangkan aspek keselamatan kerja bagi operator di lapangan. Penggunaan mesin pemanen, perangkat elektronik, serta sistem kendali otomatis dapat menimbulkan potensi risiko kerja apabila tidak dirancang dengan memperhatikan prosedur keselamatan.

Menurut *International Labour Organization* (ILO), setiap tahun sekitar 2,78 juta pekerja di seluruh dunia meninggal akibat kecelakaan kerja dan penyakit akibat kerja, sementara sekitar 374 juta kasus kecelakaan kerja non-fatal terjadi setiap tahunnya[14], [15]. Sekitar 83,6% (2,4 juta) kematian ini disebabkan oleh penyakit akibat kerja dan 13,7% (380.000) lainnya disebabkan oleh kecelakaan kerja[14]. Selain itu, data BPJS Ketenagakerjaan menunjukkan bahwa di Indonesia terdapat lebih dari 370.000 kasus kecelakaan kerja pada tahun 2023, yang sebagian besar disebabkan oleh kurangnya penerapan prosedur keselamatan kerja dan penggunaan peralatan yang tidak sesuai.[16]

Oleh karena itu, sistem harus dirancang agar tidak mengganggu aktivitas kerja operator, memiliki perlindungan dasar terhadap risiko listrik dan mekanik, serta mampu berada pada kondisi aman apabila terjadi kegagalan sistem. Penerapan mekanisme pengamanan ini harus selaras dengan prinsip keselamatan kerja serta standar keselamatan yang berlaku.

1.2.1 Kebutuhan yang harus dipenuhi

Sistem ini berfungsi mengelola hasil pemantauan keadaan lingkungan penyimpanan, mengendalikan dan memberikan peringatan. Dengan demikian sistem ini harus memenuhi kebutuhan berikut:

1. Mampu memantau kondisi lingkungan tempat penyimpanan secara *realtime*
2. Mampu menyesuaikan kondisi lingkungan tempat penyimpanan jika kondisi lingkungan penyimpanan tidak ideal
3. Memberikan peringatan jika kondisi lingkungan tempat penyimpanan tidak ideal.

1.2.2 Tujuan

Berdasarkan kebutuhan yang telah dirumuskan pada Subbab 1.2.1, proposal ini bertujuan untuk merancang solusi rekayasa yang mampu meningkatkan kualitas hasil panen dan menekan kerugian pasca panen pada komoditas pertanian. Tujuan pengembangan sistem ini adalah mengurangi kerugian pasca panen pada komoditas cabai selama proses distribusi dengan menyediakan sistem pemantauan kondisi lingkungan penyimpanan dan transportasi. Subsistem ini ditujukan untuk membantu pelaku distribusi dalam mendeteksi penyimpangan kondisi suhu, kelembaban, dan parameter lingkungan lainnya secara *real time*, serta memberikan peringatan dini agar tindakan korektif dapat dilakukan sebelum penurunan kualitas produk terjadi.

1.3 Solusi

1.3.1 Karakteristik Produk

Berdasarkan permasalahan tersebut, berikut beberapa fitur penting yang perlu ada pada solusi yang ditawarkan.

1.3.1.1 Fitur Dasar

1. *Sensing Capability*: Solusi yang ditawarkan harus mampu mendeteksi kondisi permukaan bidang potong teh secara langsung. Pada sistem distribusi cabai, *Sensing Capability* mencakup pemantauan suhu, kelembaban, dan sirkulasi udara selama proses penyimpanan dan distribusi. Data hasil sensing digunakan sebagai dasar utama untuk evaluasi kualitas pemanenan maupun kondisi kesegaran produk.
2. *Computing Capability*: Solusi yang ditawarkan harus mampu melakukan pemrosesan data hasil sensing secara efisien dengan tingkat akurasi yang tinggi dan *delay* yang rendah. Sistem komputasi harus mampu menganalisis data secara langsung (*real-time*) untuk mengidentifikasi kondisi normal maupun kondisi berisiko tanpa memerlukan waktu pemrosesan yang lama. Kemampuan ini penting agar sistem dapat merespons perubahan kondisi pengguna secara cepat dan tepat.
3. *Actuation Capability*: Solusi yang ditawarkan harus mampu melakukan aksi atau kontrol fisik berdasarkan hasil pemrosesan data oleh sistem komputasi. Pada sistem distribusi cabai, *actuation capability* mencakup pengendalian perangkat pendukung lingkungan seperti kipas, pengatur kelembaban, atau sistem ventilasi untuk mempertahankan kondisi penyimpanan yang optimal. Dengan adanya kemampuan aktuasi ini, sistem tidak hanya bersifat pemantauan, tetapi juga mampu melakukan penyesuaian secara aktif.
4. *Notification System*: Solusi yang ditawarkan harus mampu mengirimkan peringatan atau notifikasi secara otomatis kepada pengguna atau pihak terkait segera setelah kondisi kritis atau berisiko terdeteksi. Notifikasi dapat disampaikan melalui indikator visual, suara, getaran, maupun perangkat eksternal seperti smartphone, sehingga informasi dapat diterima dengan cepat dan mudah dipahami.

1.3.1.2 Fitur Tambahan

1. *Low Cost*: Sistem yang dikembangkan harus memiliki biaya produksi dan implementasi yang rendah agar mudah diadopsi oleh petani dan distributor. Dengan memanfaatkan komponen sensor dan mikrokontroler yang ekonomis serta desain modular yang sederhana, biaya sistem ditargetkan tetap berada dalam batas yang ditentukan tanpa mengorbankan fungsi utama, baik untuk aplikasi pemanenan teh maupun distribusi cabai.
2. *Low Power Consumption*: Sistem sebaiknya dirancang hemat energi agar dapat digunakan dalam jangka waktu lama di lapangan. Pengelolaan daya dilakukan melalui penggunaan sensor berdaya rendah, pengoperasian sistem secara periodik, serta penerapan mode tidur pada unit komputasi. Hal ini penting mengingat sistem digunakan pada lingkungan kebun atau distribusi yang tidak selalu memiliki sumber daya listrik yang stabil.
3. *User Friendly*: Sistem dirancang agar mudah dipasang dan digunakan pada saat proses pemanenan dan distribusi. Pada sistem pemanenan teh, desain yang ringkas memungkinkan pemasangan tepat pada mesin panen. Pada sistem distribusi cabai, sistem dapat ditempatkan langsung pada ruang penyimpanan atau wadah distribusi. Fitur ini memastikan sistem dapat segera digunakan di lapangan dengan waktu instalasi dan kalibrasi yang minimal.
4. *Durability & Environmental Resistance*: Sistem dirancang tahan terhadap kondisi lingkungan lapangan seperti getaran, debu, kelembaban, dan perubahan suhu. Fitur ini penting untuk memastikan keandalan sistem saat digunakan di kebun teh maupun selama proses distribusi cabai yang melibatkan mobilitas dan kondisi lingkungan yang bervariasi.

1.3.2 Usulan Solusi

Sistem difokuskan pada upaya pengendalian kondisi lingkungan penyimpanan saat distribusi untuk menekan laju kerusakan hasil pertanian akibat perlakuan pascapanen yang kurang tepat. Usulan solusi pada subsistem ini dirancang untuk memastikan parameter lingkungan utama, seperti suhu, kelembaban, dan kondisi

udara mikro, dapat dipantau dan dikendalikan secara berkelanjutan selama proses distribusi.

1. Solusi 1: Sistem prediksi dan pengendalian kerusakan cabai berbasis *electronic nose* (e-nose) menggunakan metode *machine learning*

Solusi pertama dirancang sebagai sistem pengendalian mikroklimat yang bekerja dengan memanfaatkan indikator fisiologis produk secara langsung, yaitu perubahan komposisi gas volatil yang dihasilkan cabai selama respirasi dan tahap awal pembusukan. Sistem ini diaplikasikan pada wadah distribusi cabai yang diperlakukan sebagai ruang tertutup atau semi-tertutup seperti box kontainer, di mana udara di dalamnya terus berubah akibat aktivitas produk dan pengaruh lingkungan luar selama transportasi.

Secara fisik, sistem diwujudkan dalam bentuk kotak kendali pintar yang dipasang pada bagian sisi luar atau tutup wadah distribusi. Kotak ini terdiri atas dua ruang utama, yaitu ruang sensor gas dan ruang kendali–aktuator. Ruang sensor gas dilengkapi dengan saluran masuk dan keluar udara sehingga udara dari dalam wadah dapat dialirkan melewati sensor. Aliran udara ini penting agar pembacaan sensor *e-nose* merepresentasikan kondisi udara aktual di sekitar cabai, bukan udara statis di dalam kotak perangkat.

Di dalam ruang sensor, terdapat array sensor gas volatil yang disusun untuk menangkap pola perubahan senyawa volatil, seperti etilena dan senyawa organik volatil lain yang berkaitan dengan aktivitas respirasi dan degradasi jaringan. Sensor suhu dan kelembaban juga ditempatkan pada jalur aliran udara untuk membaca kondisi mikroklimat secara simultan. Udara dari dalam wadah ditarik masuk menggunakan kipas berkecepatan rendah, melewati sensor, kemudian dialirkan kembali atau dibuang keluar wadah tergantung strategi ventilasi yang diterapkan.

Data gas volatil yang diperoleh sensor tidak digunakan secara tunggal, melainkan diproses lebih lanjut untuk membentuk representasi kondisi

fisiologis produk. Sinyal sensor terlebih dahulu dinormalisasi dan disaring untuk mengurangi derau serta pengaruh *drift* sensor. Selanjutnya, keluaran beberapa sensor gas digabungkan untuk menghasilkan indikator kondisi gas gabungan yang merepresentasikan tingkat aktivitas respirasi cabai di dalam wadah. Indikator ini menjadi ciri utama yang membedakan solusi ini dari pendekatan pengendalian berbasis suhu dan kelembaban saja.

Indikator kondisi gas gabungan bersama dengan data suhu dan kelembaban kemudian diproses oleh unit komputasi menggunakan model machine learning atau aturan kendali adaptif yang telah dilatih sebelumnya. Model ini berfungsi untuk mengklasifikasikan kondisi penyimpanan, misalnya normal, mulai berisiko, atau kritis, berdasarkan pola gas dan kondisi lingkungan. Ketika sistem mendeteksi peningkatan aktivitas respirasi atau indikasi awal penurunan mutu, unit kendali akan mengeluarkan perintah korektif.

Perintah kendali tersebut digunakan untuk mengatur aktuator yang terpasang pada wadah penyimpanan. Aktuator pendinginan diaktifkan untuk menurunkan suhu udara di dalam wadah secara bertahap, sementara kipas ventilasi bekerja mengeluarkan udara panas, uap air, dan gas hasil respirasi, sekaligus membantu perataan kondisi udara di dalam ruang penyimpanan. Perubahan kondisi lingkungan akibat kerja aktuator kembali terdeteksi oleh sensor *e-nose* dan sensor lingkungan, sehingga membentuk loop umpan balik tertutup yang terus menyesuaikan kondisi iklimat selama distribusi berlangsung.

Pendekatan ini menjadikan sistem tidak hanya bereaksi terhadap perubahan suhu atau kelembaban, tetapi juga terhadap perubahan kondisi fisiologis produk secara langsung. Dengan demikian, pengendalian dapat dilakukan lebih dini, bahkan sebelum gejala kerusakan terlihat secara visual, sehingga solusi ini berpotensi menekan penurunan mutu cabai secara lebih efektif selama tahap distribusi.

2. Solusi 2: Sistem Pemantauan dan Pengendalian Kesegaran Cabai Berbasis Kapsul Sensorik Nirkabel

Solusi kedua ini dirancang sebagai sistem pengendalian mikroklimat yang bekerja langsung di dalam ruang penyimpanan cabai selama distribusi. Wadah distribusi diperlakukan sebagai ruang tertutup berbentuk kotak (kontainer penyimpanan) yang digunakan untuk menampung cabai selama proses distribusi, di mana suhu, kelembaban, dan kualitas udara di dalamnya dapat berubah akibat respirasi produk serta pengaruh lingkungan luar. Untuk menangkap kondisi aktual yang dialami cabai, sistem menggunakan kapsul sensorik nirkabel berukuran kecil yang ditempatkan langsung di antara tumpukan cabai.

Secara fisik, kapsul sensorik berbentuk silinder kecil dengan dinding berlubang yang memungkinkan udara di sekitarnya masuk secara bebas ke dalam kapsul. Di dalam kapsul terdapat sensor suhu dan kelembaban untuk mengukur kondisi mikroklimat, serta sensor gas volatil untuk mendeteksi perubahan awal aktivitas fisiologis cabai. Kapsul tidak memiliki komponen penggerak dan hanya berfungsi sebagai pengamat kondisi lingkungan, sehingga ukurannya ringkas dan tidak mengganggu penataan produk. Penempatan kapsul dilakukan pada beberapa titik di dalam tumpukan, misalnya di bagian tengah dan dekat sudut wadah, untuk menangkap perbedaan kondisi yang sering terjadi akibat kepadatan produk dan keterbatasan sirkulasi udara.

Data yang diperoleh kapsul dikirimkan secara nirkabel ke unit pengendali utama yang dipasang pada bagian luar wadah distribusi. Unit pengendali ini berbentuk kotak kontrol yang berisi mikrokontroler, rangkaian penguat daya, serta aktuator pengatur lingkungan. Penempatan di luar wadah dipilih agar komponen elektronik terlindungi dari kelembaban tinggi dan kontaminasi, sekaligus memudahkan akses daya dan perawatan.

Unit pengendali menerima data suhu dan kelembaban dari seluruh kapsul, kemudian menentukan kondisi representatif ruang penyimpanan, misalnya dengan mengambil nilai tertinggi sebagai kondisi terburuk di dalam wadah. Nilai tersebut dibandingkan dengan nilai *set-point* penyimpanan cabai yang telah ditentukan sebelumnya. Selisih antara kondisi aktual dan *set-point* menjadi masukan bagi sistem kendali tertutup berbasis algoritma kontrol.

Keluaran sistem kendali digunakan untuk mengatur aktuator berupa elemen pendingin dan kipas sirkulasi udara. Elemen pendingin dipasang pada salah satu sisi wadah dan bekerja menurunkan suhu udara di dalam ruang penyimpanan secara bertahap. Sementara itu, kipas sirkulasi berfungsi mengalirkan udara dari bagian dalam wadah melewati area pendinginan dan kembali ke ruang penyimpanan, sehingga penurunan suhu terjadi secara merata dan tidak hanya terfokus pada satu titik. Kipas juga membantu mengurangi akumulasi uap air dan gas respirasi yang dapat mempercepat pembusukan.

Seluruh proses berlangsung dalam *loop* tertutup, di mana perubahan kondisi lingkungan akibat kerja aktuator kembali terdeteksi oleh kapsul sensorik di dalam tumpukan cabai. Dengan mekanisme ini, sistem tidak hanya memantau kondisi lingkungan, tetapi secara aktif mempertahankan iklim mikro mendekati kondisi optimal meskipun terjadi gangguan selama distribusi, seperti perubahan suhu lingkungan luar atau getaran selama transportasi.

Pendekatan ini menjadikan kapsul sensorik nirkabel tidak sekadar alat pemantau, tetapi bagian integral dari sistem pengendalian yang menghubungkan kondisi aktual produk dengan tindakan korektif pada lingkungan penyimpanan. Dengan demikian, solusi ini secara langsung menjawab kebutuhan pengendalian mutu cabai pada tahap distribusi yang selama ini sulit dicapai dengan metode pemantauan konvensional.

3. Solusi 3: Sistem Monitoring Kualitas Cabai Berbasis Kamera Termal dan Sensor Mikroklimat

Solusi ketiga dirancang sebagai sistem pengendalian lingkungan penyimpanan yang memanfaatkan informasi distribusi suhu permukaan produk secara spasial. Pada praktik distribusi cabai, perbedaan kepadatan tumpukan dan keterbatasan sirkulasi udara sering menyebabkan terbentuknya area tertentu dengan suhu lebih tinggi dibandingkan area lain. Area ini berpotensi menjadi titik awal percepatan respirasi dan pembusukan yang tidak terdeteksi oleh sensor titik tunggal.

Sistem ini diwujudkan melalui pemasangan kamera termal pada bagian atas atau sisi dalam wadah distribusi, dengan posisi menghadap langsung ke permukaan tumpukan cabai. Penempatan kamera pada bagian atas memungkinkan kamera menangkap citra suhu permukaan secara menyeluruh tanpa bersentuhan langsung dengan produk. Selain kamera termal, sensor mikroklimat berupa sensor suhu dan kelembaban udara ditempatkan di bagian dalam wadah sebagai referensi kondisi udara secara umum.

Kamera termal menghasilkan citra suhu permukaan cabai dalam bentuk peta panas yang menunjukkan variasi suhu antar area di dalam wadah. Citra ini dikirimkan ke unit pengendali untuk diproses lebih lanjut. Pada tahap awal, citra termal mengalami proses preprocessing untuk mengurangi derau dan menormalkan skala suhu agar perbedaan suhu antar area dapat dianalisis secara konsisten.

Analisis spasial dilakukan dengan mengidentifikasi area yang memiliki suhu lebih tinggi dibandingkan lingkungan sekitarnya menggunakan teknik ambang adaptif. Dari hasil analisis ini, sistem menghitung parameter statistik seperti deviasi suhu antar area dan luas area bersuhu tinggi. Parameter tersebut digunakan sebagai indikator adanya ketidakseimbangan lingkungan atau terbentuknya titik panas di dalam wadah penyimpanan.

Berdasarkan hasil analisis citra termal dan data sensor mikroklimat, unit kendali menentukan tindakan korektif yang diperlukan. Jika sistem mendeteksi peningkatan suhu lokal pada area tertentu, kipas sirkulasi diaktifkan atau ditingkatkan untuk meratakan distribusi udara di dalam wadah. Jika suhu rata-rata ruang penyimpanan meningkat, sistem pendinginan diaktifkan untuk menurunkan suhu udara secara keseluruhan. Dengan pendekatan ini, pengendalian tidak dilakukan secara seragam tanpa arah, melainkan difokuskan pada kondisi dan area yang benar-benar membutuhkan intervensi.

Seluruh proses pengendalian berlangsung dalam mekanisme umpan balik tertutup, di mana perubahan distribusi suhu akibat kerja aktuator kembali terekam oleh kamera termal pada siklus berikutnya. Dengan demikian, sistem mampu mengevaluasi efektivitas tindakan korektif secara langsung dan menyesuaikan strategi pengendalian apabila ketidakseimbangan suhu masih terdeteksi.

Keunggulan utama solusi ini terletak pada kemampuannya memberikan representasi visual kondisi penyimpanan secara menyeluruh dan non-destruktif. Dengan memanfaatkan informasi spasial suhu permukaan, sistem dapat mendeteksi dan menangani titik panas yang berpotensi mempercepat penurunan mutu cabai, terutama pada wadah distribusi berkapasitas besar atau dengan kepadatan produk tinggi, yang sulit dikendalikan menggunakan sensor titik tunggal.

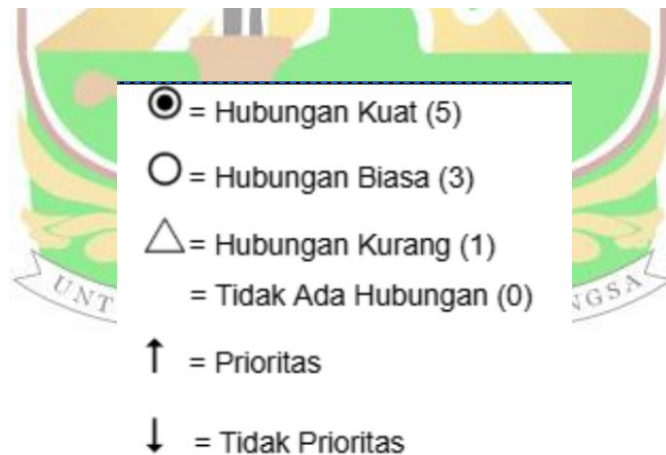
1.3.3 Analisis Usulan Solusi

Untuk memastikan bahwa solusi yang diusulkan benar-benar menjawab permasalahan kualitas hasil panen dan kerugian pasca panen secara sistemik, dilakukan analisis menggunakan metode *House of Quality* (HOQ). Metode ini digunakan untuk menerjemahkan kebutuhan sistem yang telah dirumuskan ke dalam karakteristik teknis yang terukur, sekaligus membandingkan alternatif solusi

secara objektif berdasarkan tingkat kepentingannya. Dengan pendekatan HOQ, proses pemilihan solusi tidak hanya didasarkan pada kecanggihan teknologi, tetapi pada kesesuaian solusi terhadap kebutuhan nyata di lapangan, keterbatasan operasional, serta tujuan peningkatan mutu secara berkelanjutan.

Tabel 1.1 House of Quality

House of Quality			Fitur Dasar				Fitur Tambahan				
			↑	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↓	
Aspek/konstrain	Importance a Rating (1 = Low, 5 = high)	percent of Importance Rating	Sensing Capability	Computing Capability	Actuation Capability	Notification System	Low Cost	Low Power Consumption	User Friendly	Durability & Environmental Resistance	
Keterbatasan Lahan	5	23.81%	△	○	○	△	○	○	△	●	
Keterbatasan Pendanaan	5	23.81%	○	△	△	○	●	●	○	△	
Variasi Latar Belakang Pendidikan	4	19.05%	○	△	△	●	○	○	●	○	
Pembatasan limbah lingkungan	3	14.29%	●	○	○	○	○	○	△	●	
Keselamatan Kerja	4	19.05%	△	●	●	○	△	○	○	●	
Importance Rating			49	53	63	63	63	63	65	77	Total
Percent of Importance			9.88%	10.69%	12.70%	12.70%	12.70%	12.70%	13.10%	15.52%	100%
Subsistem 2	Solusi 1		○	○	●	△	△	△	△	○	2.22
	Solusi 2		●	●	△	●	●	●	●	●	4.49
	Solusi 3		○	●	△	△	○	△	△	△	1.87



Gambar 1.1 Keterangan Simbol HoQ

Berdasarkan Tabel 1.1 *House of Quality* di atas didapatkan poin akhir dari setiap solusi sebagai berikut:

Solusi 1

$$[(3 \times 9,88\%) + (3 \times 10,69\%) + (5 \times 12,70\%) + (1 \times 12,70\%) + (1 \times 12,70\%) + (1 \times 12,70\%) + (1 \times 13,10\%) + (3 \times 15,52\%)]$$

$$=0,296+0,321+0,635+0,127+0,127+0,127+0,131+0,466$$

$$= 2,22$$

Solusi 2

$$[(5 \times 9,88\%) + (5 \times 10,69\%) + (1 \times 12,70\%) + (5 \times 12,70\%) + (5 \times 12,70\%) + (5 \times 12,70\%) + (5 \times 13,10\%) + (3 \times 15,52\%)]$$

$$=0,494+0,535+0,127+0,635+0,635+0,635+0,655+0,776$$

$$= 4,49$$

Solusi 3

$$[(3 \times 9,88\%) + (5 \times 10,69\%) + (1 \times 12,70\%) + (1 \times 12,70\%) + (3 \times 12,70\%) + (1 \times 12,70\%) + (1 \times 13,10\%) + (1 \times 15,52\%)]$$

$$=0,296+0,535+0,127+0,127+0,381+0,127+0,131+0,155$$

$$=1,87$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa Solusi 2 merupakan alternatif terbaik, dengan nilai paling tinggi dan konsisten memberikan kontribusi besar pada fitur teknis yang sangat dibutuhkan, seperti efisiensi daya, ketahanan lingkungan, serta kemudahan penggunaan. Dari analisa diatas masing masing solusi dibandingkan berdasarkan fitur yang ada, adapun penjelasannya adalah seperti berikut :

1. Fitur Dasar

a. Analisis Solusi 1

Solusi 1 menunjukkan performa sedang dengan nilai akhir sebesar 2,23 berdasarkan hasil *House of Quality*. Solusi ini memiliki *Actuation Capability* yang kuat dan *Sensing Capability* yang cukup baik, sehingga mampu menjalankan fungsi pemantauan dan pengendalian lingkungan penyimpanan cabai pada tingkat dasar.

Namun, kelemahan utama terletak pada sistem notifikasi yang kurang responsif dalam menyampaikan informasi secara real-time kepada pengguna. Selain itu, ketergantungan yang tinggi terhadap

mekanisme aktuasi membuat sistem menjadi lebih kompleks dan meningkatkan konsumsi daya, yang tercermin pada nilai rendah untuk fitur *Low Power Consumption*.

Dengan berbagai keterbatasan tersebut, solusi ini dinilai masih kurang optimal, terutama dalam lingkungan distribusi yang dinamis dan membutuhkan sistem yang ringkas serta efisien.

b. Analisis Solusi 2

Solusi 2 memperoleh nilai tertinggi sebesar 4,49, menjadikannya solusi terbaik untuk Subsistem 2 berdasarkan hasil *House of Quality*. Solusi ini menunjukkan kinerja unggul dan seimbang pada hampir semua fitur teknis, terutama:

Sensing Capability yang tinggi, memungkinkan pemantauan lingkungan penyimpanan secara akurat dan berkelanjutan. *Notification System* yang dirancang real-time, sehingga pengguna dapat merespons kondisi penyimpanan secara cepat. *Low Power Consumption* yang optimal berkat pemilihan sensor dan modul hemat daya. *User Friendly* dan *Durability* dengan nilai maksimum, memastikan sistem dapat digunakan dengan mudah dan tahan terhadap kondisi distribusi yang ekstrem.

Solusi ini juga unggul dalam kemudahan pemasangan dan mobilitas (*Easy Installation & Deployment*), karena desain modular dan portabelnya memungkinkan integrasi cepat ke berbagai media distribusi tanpa memerlukan modifikasi besar.

Dengan kombinasi performa teknis dan efisiensi tinggi, Solusi 2 menjadi solusi paling ideal dan siap diimplementasikan pada skala luas dalam sistem distribusi cabai.

c. Analisis Solusi 3

Solusi 3 menunjukkan nilai akhir terendah yaitu 1,88, yang menunjukkan kontribusi paling rendah terhadap kebutuhan sistem. Meskipun memiliki *Computing Capability* yang baik, solusi ini mengalami kekurangan serius pada *Notification System*, *Actuation Capability*, dan aspek durabilitas, sehingga kurang mampu berfungsi optimal dalam situasi nyata.

Sistem ini juga memiliki keterbatasan dalam fleksibilitas instalasi dan kurang efisien untuk pemantauan dinamis di medan distribusi. Akibatnya, Solusi 3 hanya cocok sebagai pelengkap atau referensi desain alternatif, bukan sebagai solusi utama yang dapat diandalkan.

2. Fitur Tambahan

Berikut penjelasan dari *House of Quality* pada fitur tambahan Subsistem 2. Penentuan rating HOQ pada fitur tambahan didasarkan pada bagaimana fitur-fitur tersebut mendukung dan memperkuat fitur dasar dalam memenuhi kebutuhan sistem distribusi secara keseluruhan.

- a. *Low Cost*: Fitur ini dinilai sangat penting karena sistem distribusi cabai dirancang untuk skala luas dan penggunaan di berbagai titik distribusi. Oleh karena itu, efisiensi biaya menjadi kriteria utama. Sistem yang dipilih harus menggunakan komponen lokal yang mudah didapat, serta unit pemrosesan yang efisien namun terjangkau. Rating tinggi pada fitur ini dikaitkan erat dengan *Computing Capability*, karena pemilihan prosesor dan komponen cerdas harus mampu menjalankan fungsinya tanpa membebani biaya keseluruhan sistem. Solusi 2 unggul dalam aspek ini karena memadukan performa baik dengan efisiensi harga.
- b. *Low Power Consumption*: Fitur ini sangat krusial dalam konteks distribusi yang tidak selalu memiliki akses listrik. Sistem harus mampu beroperasi secara mandiri dalam jangka waktu lama, misalnya selama proses pengiriman. Rating tinggi diberikan pada

sistem yang menggunakan sensor dan modul komunikasi berdaya rendah, yang secara langsung berpengaruh pada *Sensing Capability* dan *Notification System*. Efisiensi daya memastikan data dapat terus dikirimkan tanpa gangguan. Solusi 2 kembali mendapat skor maksimum pada fitur ini.

- c. *Easy Installation & Deployment*: Distribusi produk hortikultura seperti cabai menuntut sistem yang fleksibel, cepat dipasang, dan mudah dipindahkan. Sistem harus mampu bekerja pada berbagai jenis media seperti wadah plastik, box pendingin, atau kendaraan logistik. Penilaian tinggi pada fitur ini mendukung *Notification System*, karena pemasangan yang mudah dan antarmuka yang sederhana memungkinkan pengguna langsung memahami dan memanfaatkan sistem tanpa pelatihan teknis lanjutan. Desain modular dan portable dari solusi 2 menjadikannya unggul dalam fitur ini.
- d. *Durability & Environmental Resistance*: Sistem distribusi menghadapi berbagai kondisi ekstrem, seperti fluktuasi suhu, kelembaban tinggi, dan guncangan mekanis. Oleh karena itu, sistem harus memiliki daya tahan fisik dan fungsional yang tinggi. Rating pada fitur ini memiliki korelasi langsung dengan *Sensing Capability*, karena sensor harus tetap stabil dan akurat meskipun berada dalam kondisi tidak ideal. Sistem yang mampu mempertahankan performa pada situasi dinamis akan memastikan kualitas produk tetap terjaga. Solusi 2 meraih skor penuh karena daya tahannya yang baik dalam lingkungan distribusi.

1.3.4 Solusi yang dipilih

Berdasarkan hasil analisis menggunakan *House of Quality* (HoQ) pada Subsistem 2, dapat disimpulkan bahwa Solusi 2 merupakan solusi yang paling optimal karena memperoleh nilai akhir tertinggi dibandingkan solusi lainnya. Hasil ini menunjukkan bahwa Solusi 2 memiliki kemampuan paling baik dalam memenuhi kebutuhan sistem distribusi yang telah ditetapkan.

Solusi 2 unggul karena dirancang dalam bentuk kapsul sensorik yang portabel, mandiri, dan adaptif. Kapsul sensorik ini ditempatkan langsung di antara tumpukan cabai selama proses distribusi, sehingga memungkinkan sistem untuk melakukan *monitoring real-time* terhadap kondisi mikro produk, seperti gas volatil, suhu, dan kelembaban, secara lebih akurat. Pendekatan ini mampu merepresentasikan kondisi aktual produk dengan lebih baik dibandingkan metode *monitoring* jarak jauh.

Keunggulan Solusi 2 juga selaras dengan hasil HOQ yang menunjukkan bahwa *Sensing Capability* dan *Notification System* merupakan karakteristik teknis dengan bobot kepentingan tertinggi pada Subsistem 2. Solusi ini mampu mendeteksi potensi risiko kerusakan secara dini dan mengirimkan notifikasi peringatan *real-time* kepada pengguna ketika kondisi distribusi berada di luar batas aman. Dengan adanya notifikasi yang cepat, pengguna dapat segera mengambil tindakan korektif untuk mencegah penurunan kualitas produk.

Selain itu, Solusi 2 menawarkan kemudahan penggunaan yang lebih baik dibandingkan solusi lainnya. Desainnya yang nirkabel, ringkas, serta mudah dipasang dan dipindahkan menjadikannya sangat sesuai untuk diterapkan pada lingkungan distribusi yang dinamis. Hal ini mendukung kebutuhan *easy installation & deployment* serta *low power consumption*, yang menjadi faktor penting dalam sistem distribusi berbasis sensor.

Meskipun Solusi 1 dan Solusi 3 memiliki keunggulan pada beberapa aspek tertentu, kedua solusi tersebut masih memiliki keterbatasan dalam hal fleksibilitas penempatan sensor, efektivitas notifikasi, dan kemudahan implementasi secara menyeluruh. Oleh karena itu, berdasarkan hasil evaluasi *House of Quality*, Solusi 2 dipilih sebagai solusi terbaik untuk Subsistem 2 karena mampu memberikan keseimbangan paling optimal antara akurasi *monitoring*, kemudahan penggunaan, efisiensi sistem, dan integrasi dengan sistem pengendalian.

Dengan karakteristik tersebut, Solusi 2 dinilai paling sesuai untuk menekan potensi *food loss* pada komoditas cabai selama proses distribusi, serta mendukung sistem pengendalian mutu pertanian yang dirancang secara efektif dan berkelanjutan.

