

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan Masalah

Indonesia merupakan negara dengan sumber daya alam yang beragam. Sebagai negara agraris, komoditas yang paling dominan ialah komoditas pertanian. Pertanian menjadi salah satu sektor yang dapat menghasilkan sumber daya khususnya sumber daya pangan. Sumber daya pangan lokal merupakan salah satu hal yang mampu membantu masyarakat dalam memenuhi kebutuhan pangan. Dunia pernah mengalami krisis pangan sekitar tahun 2007-2008an. Buruh tani, petani pedesaan, petani skala kecil, dan kaum miskin yang paling menderita atas terjadinya kerawanan pangan, kelaparan, dan malnutrisi. Krisis pangan yang terjadi menyebabkan menurunnya tingkat ketahanan pangan pada masyarakat. Ketahanan pangan merupakan hal yang paling penting bagi manusia untuk hidup dan berkembang. Berdasarkan Undang-Undang No. 18 Tahun 2012 tentang Pangan dijelaskan bahwa yang dimaksud dengan ketersediaan pangan adalah kondisi tersedianya pangan hasil produksi dalam negeri dan cadangan pangan nasional serta impor apabila kedua sumber utama tidak dapat memenuhi kebutuhan. [1]

Penanganan pasca panen pada komoditas tanaman pangan bertujuan mempertahankan komoditas yang telah dipanen dalam kondisi baik serta layak. Pengeringan atau dehidrasi merupakan metode yang digunakan untuk menghilangkan sebagian air yang tersimpan pada material melalui proses penguapan. Berkurangnya kadar air akan menyebabkan penurunan nilai kandungan kelembaban bahan pangan sehingga akan menahan kemampuan pengembangan mikroorganisme, menonaktifkan enzim dan mencegah berbagai zat potensial dan respons biokimia yang menyebabkan kerusakan kualitas pangan. Oleh sebab itu proses pengeringan menjadi tahapan penting proses pengolahan bahan pangan karena dapat memperpanjang umur simpannya.[2]

Olahan pangan lokal seperti rumput laut, bawang, kerupuk kulit, dan berbagai produk UMKM lainnya sangat bergantung pada proses pengeringan sebagai tahap dalam menjaga mutu dan memperpanjang umur simpan. Namun, sebagian besar

pelaku usaha kecil dan menengah masih menggunakan metode penjemuran tradisional yang mengandalkan panas matahari. Kondisi cuaca yang tidak stabil menyebabkan intensitas pencahayaan matahari menjadi tidak optimal. Ketidakpastian cuaca memicu fluktuasi pencahayaan, terutama ketika sinar matahari terhalang oleh awan atau polusi udara yang menghalangi distribusi cahaya secara merata [3]. Kondisi ini membuat proses penjemuran tradisional menjadi tidak stabil dan sulit diprediksi. Selain itu, metode pengeringan yang masih bergantung pada matahari memiliki keterbatasan seperti ketergantungan pada kondisi cuaca, waktu proses yang tidak menentu, serta risiko kontaminasi dari debu, serangga, dan polutan lingkungan. Akibatnya kualitas produk menjadi tidak konsisten, daya simpan rendah dan produksi sering terlambat terutama pada musim hujan yang menyebabkan keterlambatan dalam memenuhi permintaan pasar [4].

Rumput laut atau lebih dikenal dengan sebutan *seaweed* merupakan salah satu sumber daya hayati yang sangat melimpah di perairan Indonesia, yaitu sekitar 8,6% dari total biota di laut. Rumput laut sangat berpotensi guna memenuhi kebutuhan di dalam negeri maupun *ekspor*. Namun, rumput laut dari Indonesia masih berupa bahan mentah yaitu rumput laut kering. Rumput laut segar mengandung sekitar 90-95% air, sehingga sangat mudah rusak dan perlu segera dikeringkan setelah panen. Proses pengeringan rumput laut secara alami menggunakan bantuan sinar matahari yang membutuhkan waktu pengeringan 3 sampai dengan 4 hari sering menghambat kerja petani, sehingga petani rumput laut sering mengeluh karena cuaca yang tidak menentu terutama pada musim penghujan, petani sering gagal mengeringkan hasil panennya [5]. Nilai standar kadar air rumput laut kering berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI 2690:2015) adalah maksimal 30% [6]. Namun kualitas rumput laut kering yang dipasarkan oleh petani belum memenuhi standar yang dibutuhkan oleh industri pengolahan rumput laut, karena tidak optimalnya penjemuran yang dilakukan, sehingga perlu dilakukan penyortiran ulang.

Berbagai pemangku kepentingan dipengaruhi oleh permasalahan ini, termasuk petani rumput laut dan industri pengolahan yang bergantung pada pasokan rumput laut yang konsisten untuk ekspor. Petani rumput laut merupakan kelompok yang

paling terpengaruh karena variabilitas kualitas. Ketergantungan pada metode pemrosesan saat ini membatasi kapasitas petani untuk memenuhi permintaan pasar yang semakin ketat untuk rumput laut berkualitas tinggi. Keterbatasan ini tidak hanya menghambat kapasitas produksi, tetapi juga berdampak langsung pada pendapatan petani, karena para petani kesulitan menjamin pasokan dan kualitas produk yang konsisten sesuai kebutuhan pembeli. Selain itu, ketidakkonsistenan dalam kualitas menimbulkan efek merugikan pada sektor pemrosesan, karena mengganggu alur kerja produksi dan mengurangi kualitas produk akhir. Eksportir juga berkewajiban untuk mematuhi standar internasional saat mengirimkan produk. Bagi eksportir, peningkatan kualitas rumput laut akan memperkuat posisi Indonesia di pasar global.

Apabila permasalahan ini dapat diatasi, berbagai pihak akan merasakan dampak positif, di antaranya :

1. Bagi petani rumput laut, sistem pengeringan yang efisien akan meningkatkan kualitas produk secara konsisten, mengurangi kerugian susut, dan memberikan akses ke pasar yang lebih menguntungkan dengan harga jual yang stabil.
2. Bagi industri pengolah, ketersediaan bahan baku berkualitas akan memastikan kelancaran proses produksi, mengurangi biaya sortir dan pembersihan, serta meningkatkan daya saing produk akhir.
3. Bagi eksportir, peningkatan kualitas rumput laut akan memperkuat posisi Indonesia di pasar internasional.

Bawang merah merupakan salah satu komoditas hortikultura unggulan di Indonesia yang memiliki peran penting baik secara ekonomi maupun sosial. Namun demikian, penanganan pascapanen masih menjadi permasalahan utama yang dihadapi petani bawang merah. Setelah dipanen, bawang merah memiliki kadar air yang relatif tinggi, yaitu sekitar 80–85%, sehingga rentan mengalami kerusakan fisiologis seperti bertunas dan penyusutan ukuran, serta kerusakan biologis akibat serangan jamur dan bakteri. Pada kondisi ideal, bawang merah perlu dikeringkan secara bertahap hingga kadar air turun ke kisaran sekitar 65–70% agar mutu dan daya simpannya tetap terjaga. [7]

Pada praktiknya, proses pengeringan bawang merah masih banyak dilakukan dengan metode tradisional melalui penjemuran di bawah sinar matahari. Metode ini sangat bergantung pada kondisi cuaca dan tidak mampu menjamin kestabilan suhu serta kelembaban selama proses pengeringan. Fluktuasi suhu lingkungan dan kelembaban udara, khususnya pada musim hujan, menyebabkan proses pengeringan sering tidak maksimal. Akibatnya, bawang merah yang dihasilkan masih berada dalam kondisi lembab sehingga mudah membusuk, berjamur, atau bertunas selama penyimpanan, yang pada akhirnya menurunkan kualitas dan nilai jual produk [8].

Selain itu, bawang merah memiliki karakteristik pasca panen yang berbeda dibandingkan komoditas lain seperti rumput laut dan kerupuk kulit. Umbi bawang merah bersifat sensitif terhadap suhu tinggi, sehingga pengeringan pada suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan susut bobot berlebihan, pengerutan umbi, serta penurunan mutu fisik dan daya simpan. Pengeringan yang tidak merata juga berpotensi menyebabkan sebagian bawang masih lembab, sehingga memicu pertumbuhan mikroorganisme dan mempercepat proses pembusukan. Oleh karena itu, bawang merah memerlukan sistem pengeringan dengan pengendalian suhu dan kelembaban yang lebih terjaga agar penurunan kadar air dapat berlangsung secara bertahap tanpa merusak struktur umbi [9]. Pengendalian ini difokuskan pada pemantauan dan pengaturan parameter pengeringan dalam rentang operasional yang aman bagi bawang merah pada skala usaha kecil dan menengah, tanpa menuntut tingkat presisi tinggi sebagaimana sistem pengeringan industri. Pihak-pihak yang paling terdampak dari permasalahan pengeringan bawang merah adalah sebagai berikut:

1. Petani bawang merah

Pengeringan yang tidak optimal dapat menyebabkan kehilangan hasil panen, penurunan kualitas produk, serta kerugian ekonomi. Selain itu, kondisi tersebut juga membatasi kemampuan petani dalam menentukan waktu jual yang tepat.

2. Pengepul dan pedagang bawang merah

Penurunan kualitas bawang setelah proses pengeringan meningkatkan risiko kerusakan selama penyimpanan dan distribusi, sehingga menyulitkan upaya menjaga konsistensi pasokan ke pasar.

Apabila permasalahan pengeringan bawang merah dapat diatasi melalui penerapan sistem pengeringan yang lebih terkontrol, maka tingkat kehilangan hasil panen dapat ditekan secara signifikan. Bawang merah yang dikeringkan pada kondisi suhu dan kelembaban yang terkendali diharapkan memiliki mutu yang lebih stabil dan daya simpan yang lebih baik, sehingga nilai jualnya meningkat dan risiko kerugian dapat dikurangi. Bagi pengepul dan pedagang, ketersediaan bawang merah dengan kualitas yang lebih seragam akan mempermudah proses distribusi serta meningkatkan kepercayaan pasar terhadap produk bawang merah lokal.

Kerupuk kulit atau sering dikenal rambak merupakan makanan tradisional yang mempunyai nilai ekonomis yang tinggi dan digemari oleh masyarakat. Selama ini, sebagian besar dari UMKM masih menggunakan metode tradisional dalam proses pengeringan, yaitu dengan penjemuran kulit di bawah sinar matahari langsung. Metode pengeringan secara tradisional dapat dinilai tidak efisien karena kadar air pada masing-masing kerupuk kulit tidak merata, sehingga berisiko terkena jamur dan tak layak konsumsi. Hal ini membuat kualitas produk menjadi tidak konsisten, daya simpan rendah dan produksi sering terlambat terutama pada musim hujan melanda yang menyebabkan keterlambatan dalam memenuhi permintaan pasar.[4]

Menurunnya mutu pada kerupuk kulit berdampak pada beberapa *stakeholder*, di antaranya:

1. Pelaku UMKM kerupuk kulit

Kelompok utama yang berdampak adalah UMKM kerupuk kulit yang mana selama ini mengalami kendala dalam proses pengeringan. Metode tradisional yang bergantung pada cuaca membuat produksi tidak stabil, kualitas produk sering tidak merata, dan risiko kerugian meningkat.

2. Konsumen produk (berdampak secara tidak langsung)

Kelompok selanjutnya yang berdampak adalah konsumen produk yang mana jika pengeringan tidak merata maka hasil dari produk yang dirasakan

akan lebih keras dan cepat melempem serta daya simpan yang tidak lama pada masa pengonsumsi.

Dampak yang dihasilkan dari menyelesaikan masalah ini adalah membantu pelaku UMKM kerupuk kulit untuk dapat memproduksi tanpa harus lagi bergantung pada kondisi cuaca sehingga produksi menjadi stabil. Selain itu, proses pengeringan yang dilakukan juga lebih merata sehingga kualitas produk lebih konsisten dan memiliki nilai jual yang kompetitif. Dengan produksi yang lebih terjamin dan permintaan pasar yang bisa dipenuhi secara rutin, pendapatan UMKM pun berpotensi meningkat secara signifikan.

Dampak selanjutnya pada konsumen produk apabila proses pengeringan kerupuk kulit dapat dilakukan secara lebih merata, konsumen akan memperoleh produk dengan kualitas yang lebih baik. Kerupuk kulit yang kering dengan sempurna akan lebih renyah, tidak cepat melempem, dan memiliki daya simpan yang lebih lama. Selain itu, tingkat kebersihan dan keamanan pangan juga meningkat karena produk tidak lembap sehingga terhindar dari risiko jamur maupun kontaminasi mikroba. Kualitas yang konsisten ini membuat konsumen lebih puas, menumbuhkan kepercayaan terhadap produk, serta meningkatkan loyalitas dalam pembelian. Dengan demikian, konsumen diuntungkan melalui ketersediaan kerupuk kulit yang lebih higienis, tahan lama, dan sesuai dengan harapan mereka.

1.1.1 Informasi Pendukung Masalah

Proses pengeringan merupakan tahapan krusial dalam pengolahan pangan pada skala usaha mikro, kecil, dan menengah (UMKM), karena berperan langsung dalam menentukan kualitas produk, umur simpan, serta nilai jual hasil olahan. Berbagai komoditas pangan seperti rumput laut, kerupuk kulit sapi, dan bawang merah memiliki karakteristik fisik dan kadar air awal yang tinggi, sehingga sangat rentan terhadap kerusakan apabila tidak segera dikeringkan dengan metode yang tepat. Secara umum, bahan pangan segar mengandung kadar air tinggi, berkisar antara 75-90%, yang menyebabkan produk mudah mengalami pembusukan, pertumbuhan mikroorganisme, perubahan warna, serta penurunan mutu dalam waktu singkat setelah panen atau proses awal pengolahan. [10],[11]

Rumput laut segar memiliki kadar air sekitar 85-90% sehingga sangat rentan terhadap kerusakan dan pembusukan dalam beberapa hari setelah panen jika tidak segera diproses. Pada tahap pengeringan, kadar air rumput laut perlu diturunkan hingga maksimal sekitar 30% agar aman untuk penyimpanan dan distribusi [6]. Bawang merah segar juga memiliki kadar air yang cukup tinggi, yaitu 75–80%, sehingga rentan mengalami kerusakan seperti busuk, bertunas, atau terserang jamur apabila tidak segera dilakukan proses pengeringan [7]. Untuk penyimpanan yang aman, kadar air bawang merah perlu diturunkan hingga kisaran 50-60% [8]. Sementara itu, kerupuk kulit dinyatakan kering dalam kondisi mentah apabila kadar air mencapai maksimal 12% agar menghasilkan tekstur yang renbak [12].

Sebagian pelaku UMKM masih mengandalkan metode pengeringan tradisional dengan memanfaatkan sinar matahari secara langsung. Metode ini umumnya dilakukan dengan menjemur bahan pangan di atas terpal, tikar, rak bambu, jaring atau digantung di ruang terbuka. Meskipun memiliki keunggulan berupa biaya operasional yang rendah dan memudahkan penerapan, pengeringan tradisional memiliki berbagai keterbatasan salah satunya tergantung terhadap kondisi cuaca. Waktu pengeringan menjadi tidak menentu dan dapat berlangsung antara beberapa hari hingga lebih dari satu minggu, bahkan dapat tertunda hingga dua minggu pada musim hujan, yang menyebabkan pembusukan dan kehilangan hasil produksi.[13],[14]

Selain ketergantungan terhadap cuaca, pengeringan tradisional juga menimbulkan permasalahan dari sisi kualitas dan kebersihan produk. Distribusi panas yang tidak merata menyebabkan hasil pengeringan yang tidak seragam, sehingga sebagian produk masih lembap sementara yang lainnya terlalu kering. Kondisi ini sering dijumpai pada pengeringan rumput laut dan kerupuk kulit, sehingga mutu produk menjadi tidak konsisten dari segi tekstur, warna, dan kerenbakan [11],[15]. Selain itu, proses pengeringan di ruang terbuka meningkatkan risiko kontaminasi debu, pasir, serta gangguan hewan yang dapat menurunkan standar keamanan pangan dan daya jual akhir produk.[13]

Untuk mengatasi hal tersebut, berbagai teknologi pengeringan telah dikembangkan, seperti *greenhouse dryer*, oven statis, dan *cabinet dryer*. Teknologi ini mampu mempercepat waktu pengeringan, melindungi produk dari hujan, serta

meningkatkan konsistensi suhu melalui pengaturan suhu dan aliran udara. Pengeringan menggunakan oven dengan suhu terkontrol pada kisaran 50-60 °C terbukti efektif menurunkan kadar air bahan pangan hingga mencapai kondisi aman penyimpanan, sekaligus mempertahankan mutu fisik dan sensorik produk, seperti pada kerupuk kulit dan bawang merah.[11],[16],[17]

Namun demikian, penerapan teknologi pengeringan modern pada skala UMKM masih menghadapi sejumlah kendala. Beberapa sistem membutuhkan biaya investasi awal yang cukup tinggi, konsumsi energi besar, serta pasokan listrik yang stabil yang belum sepenuhnya tersedia di wilayah pedesaan dan pesisir [14],[18]. Selain itu, desain alat yang kurang sesuai dengan karakteristik bahan pangan sering menyebabkan distribusi panas yang tidak merata, sehingga sebagian produk menjadi terlalu kering sementara bagian lainnya masih lembap [14].

Permasalahan lain yang sering muncul dalam proses pengeringan pangan UMKM adalah karakteristik spesifik pangan seperti tekstur lunak, struktur mudah rusak, serta pengeringan yang menghasilkan lemak dan air selama dikeringkan. Kondisi ini, khususnya terjadi pada kerupuk kulit dan rumput laut. Hal ini dapat menyebabkan produk menjadi lengket dan sulit kering secara merata apabila tidak didukung dengan desain rak dan ruang pengeringan yang tepat. Oleh karena itu, sistem pengeringan pangan perlu dilengkapi sensor suhu yang akurat, mekanisme distribusi panas yang merata, serta desain mekanis yang mendukung karakteristik bahan yang dikeringkan.[14],[19]

Hal ini didukung berdasarkan hasil survei yang dilakukan terhadap UMKM kerupuk kulit Iswandi, diperoleh informasi bahwa salah satu masalah utama dalam proses pengeringan kerupuk kulit adalah munculnya kandungan lemak dari kerupuk yang dikeringkan. Lemak ini cenderung menetes selama proses pengeringan sehingga berpotensi membuat kerupuk menjadi lengket dan mempengaruhi kualitas akhir produk. Pihak UMKM menyarankan penggunaan rak peniris sebagai solusi untuk menampung lemak yang keluar dari kulit selama proses pengeringan. Dengan adanya rak peniris, lemak dapat tertampung secara lebih efisien, sehingga kerupuk kulit dapat dikeringkan dengan lebih merata dan higienis. Hal ini menjadi salah satu pertimbangan penting dalam perancangan

sistem pengering kerupuk kulit, khususnya terkait desain ruang pengering dan mekanisme penempatan kerupuk agar hasil pengeringan optimal dan kualitas produk tetap terjaga.

1.1.2 Analisis Masalah dan *Constraint*

Analisis permasalahan dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa aspek yang relevan terhadap proses pengeringan pangan pada skala UMKM. Setiap aspek mempunyai batasan (*constraint*) yang harus diperhatikan. Beberapa aspek antara lain :

a. Aspek Ekonomi

Ketergantungan pada metode pengeringan tradisional membuat mutu produk pangan kering seperti rumput laut, bawang merah, dan kerupuk kulit menjadi tidak stabil. Kondisi tersebut menimbulkan kerugian ekonomi berupa penurunan kualitas, susut hasil, meningkatnya kebutuhan tenaga kerja, serta berkurangnya peluang untuk menembus pasar bernilai tinggi. Selain itu, UMKM dan petani menghadapi risiko kehilangan produksi akibat faktor cuaca dan proses pascapanen yang sulit dikendalikan. Oleh karena itu, sistem pengeringan yang dirancang harus memiliki biaya investasi yang terjangkau, biaya operasional yang rendah, serta mampu menekan kehilangan hasil produk tanpa menambah beban finansial pelaku UMKM.

1. Konstrain 1 (biaya) : Harga sistem pengeringan maksimal Rp 25.000.000 untuk kapasitas UKM (20-50 kg/*batch*) sesuai kemampuan finansial UKM berdasarkan **UU No. 20 Tahun 2008** tentang Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah dan **Permenkopm UKM No. 2 Tahun 2021** tentang Kriteria dan Klasifikasi UMKM

b. Aspek Lingkungan dan keberlanjutan.

Proses penjemuran tradisional memerlukan lahan terbuka yang luas untuk menjemur produk pangan, yang semakin sulit diperoleh terutama di area perkotaan atau kawasan padat penduduk. Ketergantungan pada sumber energi konvensional untuk pengeringan buatan dapat meningkatkan emisi karbon dan biaya operasional yang tidak berkelanjutan. Selain itu, paparan langsung produk terhadap polusi udara (debu, asap kendaraan, emisi industri)

menurunkan kualitas produk dan berpotensi membahayakan kesehatan. Limbah proses pengeringan seperti produk *reject* dan air cucian juga perlu dikelola dengan baik agar tidak mencemari lingkungan. Aspek keberlanjutan menjadi penting mengingat tren global menuju praktik produksi ramah lingkungan (*green production*) dan permintaan pasar terhadap produk dengan jejak karbon rendah.

1. Konstrain 2 (material *food grade*) : Penggunaan material food grade pada seluruh bagian yang bersentuhan langsung dengan bahan pangan, seperti stainless steel 304/316 atau material lain yang memenuhi standar keamanan pangan, guna mencegah kontaminasi dan menjaga kualitas produk sesuai prinsip **ISO 22000** tentang *Food Safety Management Systems*.
2. Konstrain 3 (hemat energi listrik) : Sistem pengering harus dirancang dengan konsumsi daya listrik maksimal $\leq 3 \text{ kWh per siklus pengeringan}$ untuk kapasitas 20–50 kg/batch melalui penggunaan kontrol suhu otomatis dan foam foil, guna menekan pemborosan energi serta meningkatkan kinerja energi sesuai **ISO 50001:2018** tentang **Energy Management Systems** dan **SNI 8013:2014** tentang **Manajemen Energi**

c. Aspek Manufakturabilitas dan Teknologi

Adopsi teknologi pengeringan otomatis di kalangan UMKM terkendala oleh kompleksitas sistem yang tidak sesuai dengan kemampuan teknis operator dan infrastruktur produksi lokal. Mayoritas pelaku UMKM memiliki latar belakang pendidikan menengah dengan pengetahuan teknologi terbatas, sehingga sistem yang dirancang harus sederhana dan mudah dioperasikan. Ketersediaan komponen teknologi di pasar lokal menjadi kendala, terutama untuk suku cadang khusus yang sulit didapatkan dan mahal. Proses manufaktur sistem harus dapat dilakukan dengan teknologi dan peralatan yang tersedia di industri lokal untuk menekan biaya produksi dan memudahkan replikasi. Kemudahan perawatan dan perbaikan menjadi krusial agar sistem dapat beroperasi berkelanjutan tanpa ketergantungan pada teknisi spesialis yang sulit diakses dan biayanya tinggi. Desain produk harus

mempertimbangkan kemudahan *assembly*, standarisasi komponen, dan modularitas untuk mendukung proses manufaktur yang efisien dan *scalable*.

1. Konstrain 4 (kemudahan pemrograman dan pemeliharaan sistem kontrol)
: Sistem kontrol harus dirancang menggunakan platform pemrograman yang terstruktur, modular, dan terdokumentasi dengan baik sehingga program mudah dipahami, dimodifikasi, serta dirawat untuk mendukung keberlanjutan operasional sistem, mengacu pada prinsip **ISO/IEC 12207** tentang *Software Life Cycle Processes*.
2. Konstrain 5 (kemudahan manufaktur dan *assembly*) : Desain harus dapat diproduksi menggunakan teknologi yang tersedia di bengkel lokal (las, bubut, bor, potong) dengan toleransi umum mengikuti **ISO 2768-1 kelas coarse (c) sekitar $\pm 1-2$ mm**, sehingga proses manufaktur tetap ekonomis dan mudah direalisasikan.

1.1.3 Kebutuhan Yang Harus Dipenuhi

Berdasarkan analisis masalah sebelumnya, dirumuskan kebutuhan yang harus dipenuhi oleh sistem untuk mengatasi permasalahan pengeringan pangan pada proses pengeringan tradisional adalah sebagai berikut:

- a. Sistem harus mampu mengontrol suhu dan kelembaban secara stabil dan presisi agar proses pengeringan berlangsung optimal tanpa menurunkan kualitas produk.
- b. Sistem harus memiliki distribusi panas dan sirkulasi udara yang merata sehingga tingkat kekeringan bahan dapat tercapai secara seragam.
- c. Sistem harus bisa melakukan perhitungan penurunan kadar air untuk memastikan bahan mencapai tingkat kekeringan yang aman dan sesuai standar.
- d. Sistem harus dapat beroperasi secara otomatis dan terintegrasi dengan aplikasi IoT, sehingga memudahkan pelaku UMKM tanpa perlu pengaturan manual.

1.1.4 Tujuan

Berdasarkan hasil analisis terhadap permasalahan dan kebutuhan yang telah diidentifikasi, tujuan dari penyusunan tugas akhir ini adalah untuk merancang dan merealisasikan sistem pengeringan pangan yang mampu mengukur kadar air secara *real-time*, serta mengontrol suhu dan kelembaban secara otomatis sehingga proses pengeringan dapat berlangsung lebih merata, efisien, dan konsisten. Selain itu, sistem yang dirancang diharapkan tidak bergantung pada kondisi cuaca, mudah dioperasikan oleh pelaku UMKM, serta mampu menjaga kualitas produk hasil pengeringan agar memiliki daya simpan dan nilai jual yang lebih baik.

1.2 Solusi

Berdasarkan penjabaran sebelumnya, solusi yang diangkat pada permasalahan ini akan berfokus kepada pengeringan pangan untuk menjaga kualitas mutu tanpa dipengaruhi oleh faktor cuaca.

1.2.1 Karakteristik Produk

Berdasarkan permasalahannya, berikut beberapa fitur dasar yang akan dikembangkan sehingga menjadi solusi sistem yang tepat :

- a. *Sensing Capability* (kemampuan pendeteksian)
Sistem dilengkapi dengan sensor suhu, kelembaban, dan sensor pendukung lainnya yang bekerja secara *real-time* untuk memantau dan mendeteksi kondisi produk pangan serta lingkungan pengeringan. Sensor-sensor harus memastikan distribusi panas merata di seluruh ruang pengering dan memberikan umpan balik kepada sistem kontrol.
- b. *Control Capability* (kemampuan pengendalian)
Sistem memiliki komponen pengering terintegrasi (elemen pemanas, kipas sirkulasi, dan aktuator pendukung) yang dapat bekerja secara otomatis untuk mempercepat dan mengoptimalkan proses pengeringan produk pangan dengan tingkat presisi tinggi.
- c. *Computational Method* (metode komputasi)

Sistem menggunakan mikrokontroler sebagai pusat kendali yang menjalankan metode komputasi sesuai dengan karakteristik produk pangan yang dikeringkan.

d. **Kapasitas Pengeringan**

Sistem dirancang dengan kapasitas yang dapat disesuaikan dengan skala usaha kecil dan menengah, mampu menampung dan mengeringkan produk pangan dalam jumlah yang memadai sesuai kebutuhan produksi harian tanpa mengurangi kualitas hasil.

e. ***Communication / Connectivity* (Konektivitas Sistem)**

Sistem terintegrasi dengan jaringan komunikasi nirkabel yang memungkinkan pemantauan jarak jauh. Sistem juga mampu mendeteksi kerusakan atau kesalahan operasional dan mengirimkan peringatan kepada pengguna melalui jaringan komunikasi yang terintegrasi.

1.2.2 Usulan Solusi

Dari permasalahan yang ada pada pengeringan pangan, membutuhkan penyelesaian dengan solusi yang lebih lanjut. Dalam pembahasan ini, akan diuraikan 3 solusi yang dapat menghasilkan pengeringan pangan yang sempurna.

1.2.2.1 Solusi 1 *SpinDry Chamber* dengan Metode *Fuzzy Logic*

Solusi ini mengusulkan penggunaan ruang pengeringan khusus yang dilengkapi dengan sistem rotasi mekanis untuk memutar rak yang berisi berbagai produk olahan pangan seperti rumput laut, bawang merah, dan kerupuk kulit. Tujuan utama dari mekanisme ini adalah memastikan bahwa panas yang diberikan di dalam ruang pengering dapat tersebar secara merata ke seluruh permukaan produk. Dengan adanya rotasi, setiap sisi bahan pangan memperoleh paparan panas yang sama, sehingga risiko perbedaan tingkat kekeringan antar bagian dapat diminimalkan. Pendekatan ini tidak hanya mempercepat proses pengeringan, tetapi juga meningkatkan konsistensi mutu hasil akhir.

Selain menjamin pemerataan panas, sistem ini juga didukung oleh mekanisme kontrol suhu yang menjaga kestabilan temperatur di dalam ruang pengering. Suhu yang stabil sangat penting untuk mencegah kerusakan kualitas produk. Jika suhu

terlalu rendah, waktu pengeringan menjadi lebih lama dan hasilnya tidak optimal, sedangkan suhu yang terlalu tinggi dapat merusak tekstur, warna, atau nutrisi bahan pangan. Dengan pengaturan suhu yang presisi, seluruh produk olahan pangan dapat mencapai tingkat kekeringan ideal sesuai standar yang dibutuhkan untuk menjaga rasa, tekstur, dan daya simpan.

Solusi ini juga menawarkan kemudahan pemantauan proses. Pengguna dapat memperoleh informasi secara langsung mengenai kondisi pengeringan yang sedang berlangsung. Ketika produk telah mencapai tingkat kekeringan yang sesuai, sistem memberikan notifikasi otomatis. Fitur ini sangat membantu pelaku UMKM karena mereka tidak perlu melakukan pengawasan manual secara terus-menerus. Waktu dan tenaga dapat dialihkan untuk aktivitas produksi lainnya, sehingga efisiensi operasional meningkat.

Untuk mendukung proses pengeringan, ruang pengering dilengkapi dengan beberapa sensor, yaitu sensor suhu dan sensor kelembapan. Sensor kelembapan udara digunakan untuk mengukur tingkat kelembapan relatif sedangkan sensor suhu untuk memantau temperatur ruang pengering. Seluruh sistem dikendalikan menggunakan metode *Fuzzy Logic* yang menjadikan sistem lebih adaptif terhadap kondisi lingkungan yang bervariasi, karena keputusan yang diambil tidak sebatas benar atau salah, melainkan mengikuti tingkatan kelembapan yang terdeteksi.

Metode *Fuzzy Logic* digunakan untuk mengatur daya pemanas dan kecepatan rotasi rak secara simultan berdasarkan dua variabel utama, yaitu selisih suhu aktual terhadap suhu target (*temperature error*) dan laju penurunan kadar air produk ($\Delta M/\Delta t$). Pada tahap fuzzifikasi, kedua variabel tersebut dikonversi menjadi himpunan linguistik seperti “Rendah”, “Sedang”, dan “Tinggi”. Nilai *fuzzy* ini kemudian diproses menggunakan aturan inferensi metode mamdani untuk menghasilkan keputusan pengendalian. *Output* sistem berupa sinyal kontrol untuk mengatur intensitas pemanas serta kecepatan motor penggerak rak.

Proses pengambilan keputusan ini terdiri dari tiga tahapan utama :

1. Fuzzifikasi (mengubah data sensor menjadi nilai *fuzzy*)
2. Inferensi (penerapan aturan *IF-THEN* berbasis *fuzzy*)
3. Defuzzifikasi (menghasilkan keluaran berupa aksi nyata pada aktuator).

Secara umum, cara kerja sistem dimulai dari tahap pendeteksian suhu dan kelembapan secara *real-time* oleh sensor yang ditempatkan di dalam ruang pengeringan. Data tersebut dikirimkan ke mikrokontroler dan diproses oleh modul *fuzzy logic* yang telah diprogram dengan seperangkat aturan. Hasil keputusan *fuzzy logic* kemudian dijalankan oleh sistem dengan mengatur daya pemanas serta kecepatan motor penggerak rak. Selama proses berlangsung, pembacaan sensor dilakukan secara kontinu untuk memantau perubahan kondisi. Sistem akan terus menyesuaikan intensitas pemanas dan rotasi secara dinamis hingga produk mencapai kondisi kering optimal sesuai standar masing-masing produk.

1.2.2.2 Solusi 2 *Smart Rack* dengan Metode PID

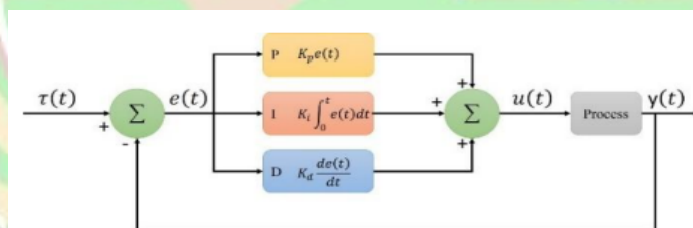
Solusi ini menggunakan pengeringan dalam bentuk rak susun yang dirancang untuk mendistribusikan panas dan aliran udara secara merata ke seluruh lapisan rak. Sistem ini menitikberatkan pada aliran udara panas di dalam ruang pengering sehingga setiap lapisan, baik bagian atas maupun bawah, memperoleh intensitas panas yang seimbang. Dengan distribusi panas yang optimal, berbagai olahan pangan seperti rumput laut, bawang merah, dan kerupuk kulit dapat mengering secara konsisten tanpa adanya bagian yang terlalu kering atau masih lembap.

Rak pengering dalam sistem ini dirancang agar mampu menyesuaikan posisi atau bergerak secara otomatis untuk memastikan paparan panas yang merata pada seluruh permukaan produk. Selain itu, sistem kontrol juga menjaga aliran udara agar tetap stabil. Aliran udara yang merata sangat penting dalam proses pengeringan karena tidak hanya mempercepat penguapan kadar air, tetapi juga mencegah terjadinya penumpukan kelembapan pada titik tertentu. Dengan demikian, hasil pengeringan menjadi lebih konsisten, dan risiko produk menjadi lembek, berubah warna, atau tidak awet dapat dihindari. Dengan adanya sistem otomatis ini, proses tersebut dapat diminimalkan karena sistem sudah dirancang untuk menjaga pemerataan panas secara mandiri, sehingga pelaku usaha tidak perlu melakukan pengawasan intensif. Waktu dan tenaga dapat dialihkan untuk aktivitas produksi lainnya yang lebih produktif, sementara proses pengeringan tetap berjalan stabil dan efisien.

Dari sisi kualitas, *Smart Rack* mampu menghasilkan produk dengan tekstur lebih baik, warna lebih seragam, dan tingkat kekeringan yang stabil. Hal ini penting karena kualitas visual dan konsistensi produk merupakan faktor utama yang mempengaruhi daya tarik konsumen. Produk yang dikeringkan secara merata memiliki peluang lebih besar untuk diterima pasar, baik pada skala lokal maupun nasional.

Untuk memastikan kestabilan suhu dan aliran udara, sistem ini menggunakan kontroler PID (*Proportional-Integral-Derivative*). Metode ini bekerja dengan membandingkan suhu aktual di dalam ruang pengering dengan suhu target yang telah ditentukan. Selisih antara keduanya disebut *error*, dan nilai *error* inilah yang menjadi dasar pengendalian. Kemudian menghasilkan sinyal kendali berdasarkan tiga komponen utama :

1. *Proportional* (P): memberikan koreksi sebanding dengan besar *error* (selisih *set point* dan nilai aktual).
2. *Integral* (I): memperhitungkan akumulasi *error* dari waktu ke waktu untuk menghilangkan *offset* yang menetap.
3. *Derivative* (D): memprediksi arah perubahan *error* sehingga mampu mempercepat respon sistem dan mengurangi osilasi.



Gambar 1. 1 Diagram blok PID [20]

Ketiga komponen tersebut digabungkan menjadi satu sinyal kontrol :

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \dots [1.1]$$

Sinyal kontrol ini digunakan untuk mengatur daya pemanas, kecepatan kipas, atau posisi *damper* sehingga suhu dan aliran udara tetap stabil sesuai kebutuhan proses pengeringan.

Sistem *Smart Rack* menerapkan *adaptive* PID terdistribusi, yaitu penerapan kontrol PID independen pada masing-masing rak pengering. Setiap rak dilengkapi sensor suhu yang memberikan umpan balik ke pengendali PID lokal. *Output* dari

setiap pengendali berupa sinyal pengaturan kecepatan kipas atau bukan *damper* pada rak tersebut.

1.2.2.3 Solusi 3 *Cabinet Dryer* dengan Sistem Gantung dengan metode PWM

Solusi ketiga yang diusulkan adalah Sistem Pengering Otomatis Berbasis *Cabinet Dryer* dengan Sistem Gantung (*Hanging System*) yang dirancang untuk mendukung proses pengeringan berbagai bahan pangan seperti bawang merah, rumput laut, dan kerupuk kulit. Sistem ini bertujuan untuk menghasilkan proses pengeringan yang lebih efisien, stabil, dan terkontrol, sehingga mampu mengurangi ketergantungan terhadap kondisi cuaca serta meminimalkan campur tangan manusia selama proses berlangsung. Sistem *cabinet dryer* bekerja berdasarkan prinsip konveksi udara panas, di mana udara dipanaskan oleh elemen pemanas dan disirkulasikan secara merata ke seluruh ruang pengering menggunakan kipas. Suhu pengeringan dijaga dalam rentang operasional yang aman dan sesuai untuk bahan pangan, dengan kisaran umum 35–50 °C, yang dapat disesuaikan berdasarkan karakteristik bahan yang dikeringkan. Pendekatan ini memungkinkan proses pengeringan berlangsung secara bertahap tanpa merusak struktur fisik maupun mutu bahan.

Komponen utama sistem terdiri dari sensor suhu, sensor kelembaban, sensor berat (*load cell*), elemen pemanas, kipas sirkulasi, serta mikrokontroler sebagai unit pengendali utama. Sensor suhu dan kelembaban berfungsi memantau kondisi lingkungan di dalam ruang pengering secara *real-time*, sedangkan sensor berat digunakan untuk mendeteksi perubahan massa bahan selama proses pengeringan sebagai indikator penurunan kadar air. Kipas sirkulasi berperan menjaga distribusi udara panas agar merata dan menghindari perbedaan kondisi antar bagian ruang pengering. Dari sisi metode komputasi, sistem ini menerapkan kendali tertutup (*closed-loop control*) berbasis pengolahan data sensor secara *real-time*. Mikrokontroler secara periodik membaca data suhu, kelembaban, dan berat bahan, kemudian membandingkannya dengan nilai referensi (*setpoint*) yang telah ditentukan. Proses pengambilan keputusan dilakukan menggunakan pendekatan *rule-based* control sederhana, di mana aksi kendali ditentukan berdasarkan kondisi aktual hasil pembacaan sensor.

Pengaturan daya elemen pemanas dan kecepatan kipas dilakukan menggunakan teknik *Pulse Width Modulation* (PWM). Nilai *duty cycle* PWM disesuaikan berdasarkan selisih antara kondisi aktual dan *setpoint*, sehingga daya yang diberikan ke aktuator dapat diatur secara bertahap dan proporsional. Metode ini memungkinkan sistem menjaga kestabilan suhu dan sirkulasi udara tanpa mekanisme *on-off* ekstrem, sekaligus membantu mengurangi konsumsi energi. Sensor berat dimanfaatkan sebagai indikator tidak langsung progres pengeringan, sehingga sistem menghitung persentase penurunan berat bahan terhadap berat awal. Informasi ini digunakan untuk memperkirakan tingkat pengeringan dan membantu menentukan kapan proses pengeringan telah mendekati kondisi yang diinginkan. Pendekatan ini bersifat praktis dan sesuai untuk aplikasi pengeringan pada skala usaha kecil dan menengah.

Proses kerja sistem dimulai ketika bahan diletakkan pada *tray* dengan sistem gantung di dalam ruang pengering. Desain gantung memungkinkan aliran udara panas bergerak secara *vertikal* dan *horizontal* tanpa hambatan, sehingga seluruh permukaan bahan memperoleh paparan panas yang lebih merata. Hal ini membantu mempercepat proses pengeringan dan mengurangi risiko kerusakan fisik akibat kontak antar bahan. Setelah itu, sistem mencatat data awal sebagai acuan dan memulai proses pengeringan secara otomatis. Selama proses berlangsung, sistem terus memantau kondisi lingkungan pengeringan. Apabila suhu atau kelembaban berada di luar batas yang ditetapkan, mikrokontroler akan menyesuaikan sinyal PWM pada elemen pemanas dan kipas. Sistem juga dilengkapi dengan mekanisme notifikasi, berupa alarm visual atau bunyi, untuk memberi peringatan apabila terjadi kondisi anomali seperti suhu terlalu tinggi atau kelembaban terlalu rendah.

Selain itu, sistem mendukung pemrosesan dan pencatatan data (*data processing & logging*). Seluruh data sensor disimpan secara berkala dan ditampilkan melalui antarmuka pengguna berbasis *website* dalam bentuk grafik suhu, kelembaban, dan perubahan berat. Antarmuka ini memungkinkan pengguna memantau proses pengeringan secara jarak jauh menggunakan perangkat komputer atau *smartphone*, serta memperoleh informasi status sistem secara *real-time*.

Dari sisi aktuator, sistem menggunakan elemen pemanas dan kipas DC yang dikendalikan langsung oleh sinyal PWM dari mikrokontroler. Pendekatan ini membuat sistem bekerja lebih hemat energi karena aktuator tidak selalu beroperasi pada daya maksimum. Secara fisik, *cabinet dryer* dirancang menggunakan material prefabrikasi seperti *stainless steel*, aluminium, dan akrilik yang tahan panas, mudah dibersihkan, dan memiliki daya tahan tinggi. Sistem ini dirancang dengan kapasitas fleksibel, yaitu sekitar 10–30 kg bahan per siklus, sehingga dapat digunakan untuk berbagai skala usaha. Dengan desain yang sederhana, komponen yang mudah diperoleh, serta metode komputasi yang tidak kompleks, sistem ini memiliki biaya produksi dan perawatan yang relatif rendah serta dapat direalisasikan dalam waktu pengerjaan yang terbatas.

Secara keseluruhan, Sistem *Cabinet Dryer* Otomatis dengan Sistem Gantung ini merupakan solusi pengeringan yang adaptif dan terkontrol untuk berbagai komoditas pangan. Sistem ini mengintegrasikan kemampuan sensing, komputasi, kendali aktuator, pencatatan data, notifikasi, dan antarmuka pengguna dalam satu kesatuan, sehingga mampu meningkatkan kualitas hasil pengeringan, menekan risiko kerusakan bahan, serta mendukung proses pascapanen yang lebih efisien dan konsisten.

1.2.3 Analisis Usulan Solusi

Berdasarkan tiga usulan solusi yang telah diusulkan sebelumnya, perlu dilakukan analisis untuk menentukan solusi yang akan dipilih. Analisis dilakukan dengan metode *House Of Quality* untuk membandingkan setiap solusi yang diusulkan berdasarkan parameter yang telah ditentukan

Tabel 1. 1 *House of Quality*

			Fitur Dasar					
			↑	↑	↑	↑	↑	
Konstrain	Rank of Importance	Percent of Importance	<i>Sensing Capability</i>	<i>Control Capability</i>	<i>Computational Method</i>	<i>Kapasitas Pengerangan</i>	<i>Communication / Connectivity</i>	
Biaya	5	26.3%	○	⊙	○	⊙	△	
Material <i>Food Grade</i>	4	21.1%	△	○		○		
Hemat Daya	3	15.8%	⊙	⊙	○	⊙	△	
Mudah Diprogram	3	15.8%	○	⊙	⊙		○	
Mudah Diproduksi	4	21.1%	○	○	△	⊙	△	
Important Rating	19	100%	55	79	43	72	21	270
Percentage of Important Rating			20.4%	29.3%	15.9%	26.7%	7.8%	100.0%
Solusi 1			○	⊙	⊙	⊙	○	4.44
Solusi 2			○	○	⊙	⊙	○	3.85
Solusi 3			○	⊙	○	△	○	3.05

Tabel 1. 2 Keterangan Hubungan Simbol HoQ

Simbol	Nilai	Hubungan
⊙	5	Berhubungan erat
○	3	Berhubungan normal
△	1	Berhubungan jauh
Kosong	0	Tidak berhubungan

Pada Tabel 1.1 ditunjukkan hasil analisis *House of Quality* (HOQ) yang membandingkan tingkat pemenuhan kriteria dari tiga usulan solusi terhadap fitur dasar dan konstrain yang telah dijabarkan sebelumnya. Setiap hubungan antara konstrain dan fitur dasar digambarkan dengan simbol ⊙, ○, dan △ yang merepresentasikan tingkat kekuatan hubungan masing-masing fitur. Nilai hubungan ini kemudian digunakan untuk menentukan solusi yang paling sesuai

dengan kebutuhan sistem pengeringan pangan. Fitur dasar yang digunakan dalam analisis meliputi *Sensing Capability*, *Control Capability*, *Computational Method*, Kapasitas Pengeringan, dan *Communication / Connectivity*, sedangkan konstrain terdiri atas biaya, material ramah lingkungan, efisiensi energi, standarisasi, serta kemudahan manufaktur dan *assembly*. Berdasarkan hasil perhitungan HOQ, bobot kepentingan terbesar terdapat pada fitur *Control Capability* (29.3%), Kapasitas Pengeringan (26.7%), dan *Sensing Capability* (20.4%) sehingga ketiga fitur ini memiliki pengaruh paling signifikan terhadap pemilihan solusi akhir.

Konstrain Biaya sangat berkaitan dengan *Control Capability* dan Kapasitas Pengeringan karena pemilihan aktuator, pemanas, dan desain ruang pengering harus sesuai dengan anggaran UMKM. Jika kapasitasnya terlalu besar, maka biaya yang dikeluarkan akan meningkat, sehingga perlu ada optimasi pada kontrol dan kapasitas agar tetap terjangkau. Konstrain ini memiliki hubungan normal dengan *Sensing Capability* dan *Computational Method*, mengingat sensor serta mikrokontroler sangat dibutuhkan, meskipun kontribusinya terhadap biaya bersifat proporsional. Sementara itu, hubungan dengan *Communication/Connectivity* tergolong jauh karena modul komunikasi nirkabel biasanya tidak memerlukan pengeluaran yang tinggi.

Konstrain Material Ramah Lingkungan memiliki hubungan normal dengan *Control Capability* dan Kapasitas Pengeringan karena casing, *chamber*, dan komponen mekanik harus menggunakan material ramah lingkungan, meskipun dampaknya tidak langsung berpengaruh pada sistem pengendalian. Namun, konstrain ini memiliki hubungan jauh dengan *Sensing Capability* karena sensor pada umumnya terbuat dari bahan semikonduktor, sehingga kontribusinya terhadap aspek ramah lingkungan relatif kecil.

Konstrain Efisiensi Energi memiliki hubungan erat dengan *Sensing Capability*, *Control Capability*, dan Kapasitas Pengeringan. Ini disebabkan oleh kebutuhan akan sensor suhu atau kelembaban untuk pemantauan penggunaan energi, otomatisasi kontrol yang sangat penting untuk efisiensi daya, serta kapasitas yang perlu dirancang untuk tetap berperforma energi efisien meskipun dalam jumlah yang besar. Konstrain ini memiliki hubungan normal dengan *Computational Method* mengingat algoritma berperan dalam mengoptimalkan penggunaan

energi, tetapi pengaruhnya tidak terlalu signifikan. Selain itu, terdapat hubungan jauh dengan *Communication/Connectivity* karena monitoring yang dilakukan dari jarak jauh tidak mengkonsumsi energi dalam jumlah yang cukup besar.

Konstrain Standarisasi memiliki hubungan erat dengan *Control Capability* dan *Computational Method*, karena standarisasi IEC menjamin bahwa logika kontrol serta metode komputasi dapat diprogram secara efisien, seragam, dan saling mendukung. Konstrain ini memiliki hubungan normal dengan *Sensing Capability* dan *Communication/Connectivity* karena sensor dan modul komunikasi perlu bersinergi dengan PLC yang telah distandarisasi.

Konstrain Kemudahan Manufaktur memiliki hubungan normal dengan *Sensing Capability* dan *Control Capability* karena pemasangan sensor dan aktuator harus dapat diproduksi secara lokal dengan batas toleransi $\pm 2\text{mm}$. Konstrain ini juga memiliki hubungan erat dengan Kapasitas Pengeringan, mengingat ruang dan rak pengering perlu diproduksi mengikuti toleransi manufaktur agar kapabilitas tetap terjaga tanpa mengurangi mutu. Sedangkan konstrain ini berhubungan jauh dengan *Computational Method* dan *Communication/Connectivity* karena *software* serta modul komunikasi tidak bergantung pada toleransi manufaktur fisik.

Berikut merupakan perhitungan menggunakan *House Of Quality* dari ketiga solusi yang ditawarkan terhadap fitur dasar, yaitu:

$$\text{Solusi 1: } (20.4\% \times 3) + (29.3\% \times 5) + (15.9\% \times 5) + (26.7\% \times 5) + (7.8\% \times 3) = 4.44$$

$$\text{Solusi 2: } (20.4\% \times 3) + (29.3\% \times 3) + (15.9\% \times 5) + (26.7\% \times 5) + (7.8\% \times 3) = 3.85$$

$$\text{Solusi 3: } (20.4\% \times 3) + (29.3\% \times 5) + (15.9\% \times 3) + (26.7\% \times 1) + (7.8\% \times 3) = 3.05$$

Solusi 1 (*Spin Dry Chamber* dengan Metode *Fuzzy Logic*) menunjukkan hubungan yang sangat erat dengan fitur kapasitas *Control Capability*, *Computational Method*, serta Kapasitas Pengeringan. Karena mekanisme rotasi rak memastikan distribusi panas yang merata, sehingga seluruh bagian bahan pangan mendapatkan eksposur yang seimbang terhadap panas. Sistem kontrol yang didasarkan pada *fuzzy logic* secara otomatis memastikan suhu dan kelembaban tetap stabil, sementara ruang pengering dapat diatur agar sesuai dengan kebutuhan UMKM tanpa mengorbankan kualitas produk akhir. Kombinasi ini menjadikan *SpinDry Chamber* unggul dalam pemerataan pengeringan serta

efisiensi proses. Selanjutnya, memiliki hubungan normal dengan *Sensing capability* yang menunjukkan bahwa sensor suhu dan kelembaban sangat penting dalam mendukung sistem, namun perannya lebih bersifat sebagai sumber data untuk kontrol *fuzzy*. Ini berarti, sensor bertindak sebagai pendeteksi kondisi, tetapi keunggulan utama sistem tetap berada pada mekanisme rotasi dan pengendalian otomatis. Hubungan normal dengan *Communication/Connectivity* yang menunjukkan bahwa sistem menyediakan pemberitahuan otomatis dan pemantauan kondisi pengeringan, tetapi fitur ini lebih bersifat tambahan untuk meningkatkan kenyamanan pengguna. Konektivitas tidak secara langsung mempengaruhi pemerataan panas atau kapasitas pengeringan, sehingga hubungannya tergolong normal.

Selanjutnya, Solusi 2 (*Smart Rack* Otomatis dengan metode PID) memperoleh nilai 3,85 dan berada di urutan kedua. Sistem ini memiliki hubungan erat dengan *Computational Method* dan Kapasitas Pengeringan, karena rak cerdas memanfaatkan PID adaptif terdistribusi. Setiap rak dilengkapi dengan pengendali PID lokal yang bisa memproses informasi suhu secara langsung. Hal ini menegaskan kekuatan dalam metode komputasi, mengingat PID efektif dalam menjaga stabilitas suhu dengan tingkat akurasi yang tinggi. Selain itu, desain rak bertingkat memungkinkan peningkatan kapasitas pengeringan sesuai dengan kebutuhan usaha mikro, kecil, dan menengah (UMKM), sehingga fitur kapasitas pengeringan sangat berkaitan dengan batasan yang telah ditetapkan. Ini juga memiliki hubungan normal dengan *Sensing Capability* dan *Control Capability* karena sensor suhu dan kelembapan digunakan untuk memberikan umpan balik kepada pengendali PID, meskipun fungsinya lebih sebagai pendukung *input* data daripada faktor utama keunggulan sistem. Begitu juga dengan *Control Capability*, kipas, *damper*, dan pemanas beroperasi secara otomatis, tetapi mekanisme pengendaliannya masih bergantung pada PID yang bersifat bertahap. Oleh karena itu, hubungan dengan sensing dan kontrol dikategorikan normal serta *Communication/Connectivity*, sebab sistem rak cerdas dapat terhubung dengan jaringan komunikasi untuk pemantauan jarak jauh, tetapi fitur ini bukanlah inti

dari keunggulan sistem. Konektivitas lebih bertindak sebagai tambahan yang mempermudah pengguna, sehingga hubungannya normal.

Sementara itu, Solusi 3 (*Cabinet Dryer* dengan Sistem Gantung dengan metode PWM) menempati posisi terakhir dengan nilai 3,05. Solusi ini memiliki hubungan erat dengan *Control Capability* karena sistem ini menggunakan teknik *Pulse Width Modulation* (PWM) untuk menyesuaikan daya pemanas dan kecepatan kipas secara bertahap. Pengendalian ini membuat sistem lebih efisien dalam penggunaan energi dan mampu mempertahankan stabilitas suhu serta perputaran udara tanpa mekanisme *on-off* yang ekstrem. Dengan demikian, elemen pengendalian menjadi kekuatan utama *Cabinet Dryer*. Hubungan normal dengan *Sensing Capability*, dimana sensor suhu, kelembapan memang digunakan untuk memantau keadaan pengeringan, namun fungsi mereka lebih sebagai pendukung data *input*, bukan sebagai elemen kunci yang menentukan keunggulan sistem. Hubungan normal dengan *Computational Method*, sistem hanya menggunakan *rule-based control* sederhana berbasis mikrokontroler, sehingga metode komputasi dianggap biasa, tidak sekuat *fuzzy logic* atau PID. Selain itu, fitur *Communication/Connectivity* berhubungan normal, sistem menyediakan antarmuka web dan notifikasi, namun fitur ini lebih bersifat tambahan untuk pemantauan jarak jauh, bukan inti dari kinerja pengeringan. Hubungan jauh dengan Kapasitas Pengeringan, karena meskipun sistem dirancang fleksibel, kapasitas pengeringan relatif terbatas dibandingkan dengan solusi lain. Desain gantung memang membantu dalam distribusi udara, tetapi tidak sepenuhnya mengatasi masalah pemerataan panas pada volume yang besar.

Berdasarkan analisis tersebut, dapat disimpulkan bahwa Solusi 1 (*SpinDry Chamber* dengan Metode *Fuzzy Logic*) merupakan solusi terbaik dengan nilai total 4,44. Ini karena solusi ini memiliki kemampuan yang paling optimal dalam menjaga distribusi suhu, stabilitas kelembapan, dan efisiensi dalam proses pengeringan. Solusi ini dianggap paling tepat untuk kebutuhan UMKM yang bergerak di bidang pengolahan pangan, karena dapat meningkatkan kapasitas produksi, memberikan pengeringan yang merata, serta mengurangi ketergantungan terhadap cuaca. Dengan demikian, *SpinDry Chamber* menjadi

pilihan utama yang direkomendasikan untuk dikembangkan pada tahap perancangan alat pengering untuk produk pangan.

1.2.4 Solusi Yang Dipilih

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan dengan menggunakan *House Of Quality* dengan menganalisa seluruh hubungan usulan solusi terhadap fitur dasar dan konstrain, diperoleh solusi 1, *SpinDry Chamber* dengan metode *Fuzzy Logic*, yang memperoleh nilai tertinggi yaitu 4,44. Solusi ini memanfaatkan metode komputasi yang berbasis pada *fuzzy logic* untuk secara otomatis mengatur suhu dan kelembapan dalam ruang pengering dengan bantuan sensor suhu dan kelembapan, yang mengolah data secara langsung melalui mikrokontroler. Selain itu, sistem ini dilengkapi dengan mekanisme rotasi mekanik yang memungkinkan distribusi udara panas menjadi lebih merata di seluruh permukaan material, sehingga proses pengeringan menjadi lebih efisien dan tingkat kekeringan produk pangan dapat lebih konsisten. Dengan penerapan sistem kontrol otomatis bersamaan dengan rotasi mekanik ini, *SpinDry Chamber* dapat meningkatkan mutu, kecepatan, dan konsistensi hasil pengeringan, sehingga menjadi solusi yang paling sesuai untuk mendukung produktivitas UMKM dalam pengolahan pangan seperti rumput laut, bawang merah, dan kerupuk kulit.

